MICROCOSMOS

Cuatro mil millones de años de evolución desde nuestros ancestros microbianos

Lynn Margulis y Dorion Sagan





METATEMAS 39

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

Título original: *Microcosmos.*
Four Billion Years of Evolution from Our Microbial Ancestors

1.ª edición: mayo 1995

Diseño de la colección: Clotet-Tusquets

Tusquets Editores, S. A. - Iradier 24, bajos - 08017 Barcelona
ISBN: 84-7223-842-3
Depósito legal: B. 18.488-1995
Fotocomposición: Foinsa - Passatge Gaiolà, 13-15 - 08013 Barcelona
Impreso sobre papel Offset-F. Crudo de Leizarán, S. A. - Guipúzcoa
Libergraf, S. L. - Constitución, 19 - 08014 Barcelona
Impreso en España

Indice

Agradecimientos

Un día de 1980, John Brockman, un pintoresco agente literario, se presentó en casa de Lynn Margulis, en Boston, ataviado al estilo de un gánster italiano. Venía de Nueva York con la intención de conseguir que escribiéramos un libro. De no haber sido por aquella visita y por el estímulo continuado de Brockman, seguramente no se habría escrito esta obra. También estamos en deuda con Katinka Matson, a quien le tocó ayudarnos durante el lustro que duró la gestación del libro. Y con Laszlo Meszoly, quien, en un corto plazo, hizo los dibujos punteados de las evocativas escenas de la evolución de la vida a través del tiempo. No podría faltar nuestro agradecimiento a Lewis Thomas por escribir el prólogo y por ser él mismo fuente de inspiración, y, junto a él, a dos personas más: al incansable viajero David Abram, por compartir con nosotros sus conocimientos de la naturaleza, y a Theodore Sturgeon, cuya historia de ciencia ficción, «El Dios microcósmico», parafraseamos en estas páginas. Estamos asimismo profundamente agradecidos a los siguientes amigos, familiares, correctores, editores y colegas: Morris Alexander, David Bermudes, Robert Boynton, Jack Corliss, Geoff Cowley, W. Ford Doolittle, Ann Druyan, Betsey Dexter Dyer, Stephen Jay Gould, Bruce Gregory, Ricardo Guerrero, James Halgring, Donald Johanson, Geraldine Kline, Edmond LeBlanc, James Lovelock, Heinz Lowenstam, David Lyons, Jennifer Margulis,

Zachary Margulis, Phylis Morrison, Elaine Pagels, John Platt, Carl Sagan, Jeremy Sagan, Marjorie Sagan, Tonio Jerome Sagan, Arthur Samuelson, Nathan Shafner, James Silberman, William Solomon, John Stolz, William Irwin Thompson, Paul Trachtman y Peggy Tsukahira. Entre ellos, sentimos que nuestro colega y amigo Elso S. Barghoorn, que tanto nos ayudó en las fases iniciales del libro, no haya vivido para verlo terminado.

La mayor parte del trabajo científico en que se basa parte del texto ha sido realizado gracias a las ayudas facilitadas por el Programa de Biología Planetaria de la NASA, la Universidad de Boston y la Fundación Richard Lounsbery. Muchas de las conclusiones que presentamos están basadas en las investigaciones y datos que se encuentran en la bibliografía especializada. Sin duda alguna, nuestra principal deuda la hemos contraído con los innumerables autores y científicos que no se mencionan en el libro y cuyo trabajo constituye el pilar de nuestra exposición. Por último, queremos agradecer a Mercè Piqueras, la traductora, a Ricard Guerrero y a Jorge Wagensberg su ayuda en la preparación de la versión española.

Presentación

La finalidad de todo prólogo es proporcionar al lector información anticipada sobre lo que encontrará a continuación. En el caso de esta obra, a menos que el lector esté completamente al día en materias como microbiología, paleontología y biología evolutiva, lo que le espera es una sorpresa tras otra, puede que incluso más de un sobresalto. El libro trata de las inextricables conexiones entre todos los seres vivos de nuestro planeta, tanto los que existen en la actualidad como los innumerables organismos que les precedieron. Margulis y Sagan proponen en estas páginas una nueva manera de contemplar el mundo, muy diferente de la que de él teníamos hace algunas décadas. Esta nueva visión está basada en sólidas investigaciones llevadas a cabo con diferentes finalidades por muchos científicos que trabajan en laboratorios dispersos por todo el mundo. Reunidos y relacionados unos con otros, sus hallazgos llevan a la conclusión de que el individualismo no tiene razón de ser en la naturaleza. La biosfera es una entidad con una unidad propia, un inmenso sistema vivo e integrado, un organismo.

Recuerdo haber asistido, hace tiempo, a una serie de seminarios universitarios que respondían al título «El lugar del hombre en la naturaleza». Trataban principalmente de cómo puede el ser humano gestionar la naturaleza para mejorarla, de manera que los asuntos del mundo procedan de modo más

agradable: cómo obtener más provecho de los recursos energéticos de la Tierra; cómo conservar determinadas zonas en su estado natural para nuestro disfrute personal; cómo evitar la contaminación de los cursos de agua; cómo controlar el crecimiento de la población humana; etcétera. El sentimiento general era que la naturaleza es una propiedad, un patrimonio recibido en herencia, dominio de la humanidad, y que sería algo así como una combinación de parque público, jardín zoológico y huerto universal.

Esta sigue siendo la manera más fácil de observar el mundo. A condición de que pueda evitarse distraer el pensamiento. Sin duda alguna, desde que los humanos ocuparon la Tierra, se han comportado siempre como la especie dominante, llevando el control de todo el planeta. Quizás al principio fuésemos más frágiles y vulnerables, recién descendidos de los árboles sin nada de lo que vanagloriarnos, salvo tener los pulgares en oposición y unos exagerados lóbulos frontales. Eramos seres que vivían en cuevas y se preocupaban del fuego. Pero tomamos posesión de la Tierra y ahora estamos diseminados por doquier, dominándolo todo, de uno a otro polo y desde la cima de las más altas montañas hasta las profundas fosas oceánicas, colonizando la Luna y observando con detenimiento el sistema solar. Somos el verdadero cerebro de la Tierra. El pináculo de la evolución, el éxito biológico más sorprendente que va a permanecer aquí para siempre.

Sin embargo, hay otra manera de observar la especie humana, y este libro es la guía que nos indica este otro modo de hacerlo. Desde el punto de vista evolutivo, somos unos recién llegados. Puede que haya, esparcidas aquí y allá, especies más recientes que la nuestra; pero ninguna a nuestra escala y en un estadio tan temprano de su evolución. No es posible encontrar trazas de la especie humana más allá de unos cientos de miles de años sin que se pierdan de vista los caracteres que consideramos propios del ser humano: la comunicación mediante el lenguaje, el utilizar la voz para cantar canciones, la construcción de herramientas, el aprovechamiento del fuego para mantener el calor corporal, la búsqueda de la comodidad y la práctica de la guerra contra individuos de la misma especie. Considerado como especie, el ser humano se encuentra aún en una fase juvenil, quizás empezando apenas a desarrollarse, aprendiendo todavía a ser humanos, como el hijo inmaduro de una especie. Además, somos vulnerables, y tendemos a equivocarnos; lo que nos hace correr el riesgo de dejar, tras nuestro paso por la Tierra, tan sólo una fina capa de fósiles radiactivos.

Para conseguir una mejor perspectiva de nuestra especie necesitamos un mejor conocimiento de nuestro linaje. Antes creíamos haber llegado de novo, *haber sido colocados aquí por un Organizador, tal vez aún antes de que nos vistiéramos, pero preparados ya para poder dar nombre a todos los animales. Posteriormente, después de Darwin, tuvimos que afrontar la vergüenza de contar con monos en algún punto de nuestro árbol genealógico y de tener que aceptar que somos primos hermanos de los chimpancés.*

Muchos niños, al llegar a la adolescencia, atraviesan un periodo difícil que se manifiesta por un descontento con la manera de ser de sus padres, y desearían que fueran diferentes, más parecidos a los padres de otras familias del vecindario. En realidad, no hay nada de qué avergonzarse por el hecho de que tengamos como parientes próximos a homínidos de aspecto un tanto extraño. Sin embargo, y puestos a elegir, la mayoría de nosotros preferiría localizar nuestros orígenes en una línea dinástica pura, deteniéndonos en ese punto sin buscar más allá.

Veamos ahora cuál es nuestro dilema. El origen de nuestra estirpe se remonta a unos 3500 millones de años atrás, cuando se formó la primera célula. Aquella célula es el antepasado más remoto de todos los seres vivos surgidos más tarde, incluido el ser humano.

Además, a pesar de nuestra elegancia y arrogancia como especie, a pesar de nuestros prominentes lóbulos frontales, a pesar de toda nuestra música, no hemos progresado mucho en relación a los microorganismos antepasados nuestros. Estos microorganismos continúan con nosotros, forman parte de nosotros. O, dicho de otra manera, nosotros formamos parte de ellos.

Admitida esta realidad, hay que reconocer que se trata de una gran historia, un poema épico maravilloso, que no ha llegado aún al final. Se trata, nada menos, de la epopeya que narra el desarrollo de la vida en nuestro planeta.

Lynn Margulis ha dedicado gran parte de su carrera científica al estudio de los detalles de esa historia, a la que ha añadido algunos otros procedentes de sus investigaciones. Ella y Dorion Sagan han reunido todos estos detalles, dándoles forma literaria, en este extraordinario libro, que no se parece en nada a ningún tratado divulgativo sobre evolución que yo haya leído antes. Se trata de un relato fascinante de lo que es, con mucho, el periodo más largo en la evolución de la biosfera; un lapso de 2500 millones de años, a lo largo del cual nuestros antepasados los microorganismos establecieron la mayoría de normas y regulaciones para la convivencia. Se trata de hábitos que los seres humanos deberíamos estudiar actualmente con atención para encontrar en ellos soluciones para nuestra propia supervivencia.

Los relatos más conocidos de la evolución y sus problemas suelen empezar contando lo que sucedió hace tan sólo unos centenares de millones de años, tratando muy superficialmente las formas primitivas de los organismos multicelulares y pasando rápidamente hacia la triunfante invención de las formas vertebradas. Da la impresión de que, en tiempos anteriores, el planeta hubiera estado ocupado por células elementales y sencillas que no hacían más que esperar el inicio del espectáculo. Margulis y Sagan precisan lo equivocado de esta interpretación y demuestran que las primeras bacterias aprendieron ya casi todo lo que hay que saber sobre la vida en un sistema, y eso es precisamente lo que nosotros sabemos hoy en día.

Quizás hayamos compartido una fase común en un primer periodo más largo de lo que creemos. Ahí está, como un fósil lingüístico, enterrada en la antigua raíz de la cual tomamos el nombre de nuestra especie. La palabra utilizada para denominar la Tierra, al principio de las lenguas indoeuropeas, hace miles de años (nadie sabe exactamente cuántos) era dhghem. *A partir de esta palabra, que no significa más que*

tierra, surgió la palabra humus, *que es el resultado del trabajo de las bacterias del suelo. Y, para darnos una lección, de la misma raíz surgieron* humilde *y* humano. *Este es el esbozo de una parábola filológica; en este libro se encuentran algunos de los detalles para completarla.*

Lewis Thomas
(1913-1993)

Prólogo de los autores a la segunda edición

¿Qué relación existe entre los humanos y la naturaleza? El nombre científico que Linneo dio a nuestra especie es *Homo sapiens sapiens*, es decir «hombre sabio, sabio». Sin embargo, nosotros proponemos humildemente, y un poco en broma, que se bautice de nuevo a la humanidad como *Homo insapiens insapiens;* es decir, «hombre, sin sabiduría, sin sabor». Nos gusta creer que regimos la naturaleza —«el hombre es la medida de todas las cosas», dijo Protágoras hace 2400 años—, pero no somos tan regios como creemos. Con este libro hemos intentado hacer trizas el ropaje dorado que sirve de propia imagen a la humanidad para desvelar que nuestra imagen autoaumentada no es más que la de un loco a escala planetaria.

Los humanos hemos sido durante mucho tiempo el equivalente planetario, o biosférico, del ego freudiano que «desempeña el papel ridículo del payaso de circo cuyos gestos intentan persuadir al público de que todos los cambios que se llevan a cabo en escena obedecen a sus órdenes». Nos parecemos a ese payaso en casi todo, aunque el egotismo humano en relación con nuestra importancia ante la naturaleza no suele tener ni pizca de gracia. Freud prosigue: «Pero sólo los más jóvenes entre el público se dejan engañar por él».[1]* Quizá

* Las notas se encuentran en las páginas 301-307. *(N. del E.)*

nuestra credulidad en relación a la ecología planetaria sea también resultado de nuestra juventud —nuestra inmadurez colectiva como una de las muchas especies que comparten la Tierra—. Pero aunque fuésemos el niño aplicado de la naturaleza, no somos esa presunción científica, «la especie más evolucionada». Como en el conocido cuento infantil, el «emperador» humano, contemplado desde la perspectiva revisionista de este libro y en la modesta opinión de sus autores, va desprovisto de traje alguno.

Un debate reciente promovido por la revista *Harper's Magazine,* con el enunciado de si «Sólo la presencia humana puede salvar la naturaleza»[2] nos proporciona un ejemplo de la visión tradicionalmente grandiosa, casi solipsística, que la humanidad tiene de sí misma. El químico atmosférico James Lovelock equipara la relación existente entre los humanos y la naturaleza a una guerra inminente; el ecofundamentalista Dave Foreman declara que, bien lejos de ser el sistema nervioso central de Gaia, o su cerebro, los humanos somos un cáncer que la está consumiendo. Por su parte, Frederic Turner, profesor de letras y humanidades de la Universidad de Texas, asegura, de manera trascendental, que la humanidad es la encarnación viviente del deseo de la naturaleza arrastrado durante miles de millones de años. Querríamos desafiar estas opiniones. En la Edad Media, los bufones tenían entre sus atributos, además de la reluciente bisutería que los adornaba y el cuchillo de madera, un globo terráqueo. Pensemos en la imagen de un bufón —con su sombrero y sus numerosas campanillas, las orejas colgantes que ondean mientras sostiene una Tierra simulada— para tener un resumen, si no menos cierto, sí más festivo, de cómo andan las cosas entre el *Homo sapiens* y la naturaleza.

A través de Platón, Sócrates nos habla de lo peligroso que es dejar escritas las opiniones propias; aunque los puntos de vista puedan cambiar, las palabras quedarán como una declaración en el papel. Sócrates al menos no escribió. Y lo que sabía, en primer lugar y ante todo, era que él no sabía nada. Los autores de este libro, sin embargo, sí que hemos escrito. Invertimos la visión normalmente exagerada de la humanidad

y tratamos al *Homo sapiens* como una clase de permutación final en la larga y continuada evolución de los habitantes de la Tierra más diminutos, de más edad y con mayor capacidad de adaptación química; es decir, las bacterias. Dejamos escrito que Gaia, el sistema fisiológico de la vida en la Tierra, podría sobrevivir a la desaparición de nuestra especie, mientras que los humanos no podríamos persistir separados de los microorganismos. *Microcosmos* tuvo, en general, buena acogida, pero fue criticado en algunos aspectos, especialmente por esta actitud poco complaciente con nuestra propia especie. Hubo quien se ofendió por la conclusión de que una guerra nuclear no tenía por qué ser un apocalipsis total, ya que las bacterias, que se encuentran en la base de cualquier forma de vida a escala planetaria, podrían sobrevivir gracias a su resistencia. A diferencia de las palabras que flotan sin crear ningún compromiso en las alas volubles de la opinión, las nuestras quedaron plasmadas como signos perdurables en el papel, como lo están ahora éstas; enfrentándonos de manera obstinada al dogma y el didactismo, en lugar de lo que debería haber sido simplemente una opinión provisional. Por suerte, esta segunda edición de *Microcosmos* nos ofrece la oportunidad, si no de volver a escribir y de revisar nuestra obra, sí de meditar sobre el libro y sus principales preocupaciones.

En la media década transcurrida desde que se publicó la primera edición han ocurrido muchas cosas en el mundo científico y en el mundo en general. En el capítulo 9 («El cerebro simbiótico») hacíamos conjeturas detalladas sobre la posibilidad de que la cola del espermatozoide humano, que impulsa el esperma al encuentro del óvulo, hubiese tenido su origen en una unión simbiótica. Sugeríamos que la cola del espermatozoide y los undulipodios de los oviductos (entre otras estructuras no visibles a simple vista) derivaban de una espiroqueta que se convirtió en el «flagelo» de una célula ancestral. En 1989 tres investigadores de la Rockfeller University publicaron un arcano informe sobre un DNA especial recién descubierto.[3] Aunque ha sido puesto en duda, este descubrimiento del DNA del cinetosoma, fuera del núcleo y estrechamente empaquetado en la base de cada flagelo celular (undu-

lipodio), es el avance científico más importante para probar la teoría simbiótica de la evolución celular desde que se desentrañó la estructura del DNA en 1953. *Microcosmos*, contrariamente a la visión neodarwiniana de la evolución como un conflicto absoluto en el que sólo sobreviven los más fuertes, anima a la exploración de una alternativa esencial: una visión interactiva y simbiótica de la historia de la vida en la Tierra. De igual manera que no sería lógico suponer que las luchas competitivas de poder por el espacio y por los recursos no desempeñan un papel en la evolución, hemos demostrado que sería también ilógico pasar por alto la importancia crucial de la asociación física entre organismos de diferentes especies, es decir, la simbiosis, como uno de los promotores más significativos en la producción de innovaciones evolutivas. Y durante la última media década los acontecimientos y las opiniones han destacado la importancia de la simbiosis y la cooperación más allá del mundo microscópico de las bacterias en evolución.

Como ha quedado simbolizado por la caída del muro de Berlín y el final de la guerra fría, parece ilógico no querer aplicar las lecciones de la evolución y la ecología al reino terrenal de lo humano y lo político. La vida es algo más que un simple juego mortal en el que engañar y matar aseguran la inyección del gen más espabilado a la siguiente generación; es también una unión simbiótica y cooperativa que permite triunfar a los que se asocian. A pesar de la poca importancia que la propia humanidad merece que se le conceda cuando se contempla la especie *Homo sapiens sapiens* desde la perspectiva planetaria de miles de millones de años de evolución celular, podemos restituirnos algo de nuestra antigua grandeza evolutiva al reconocer a nuestra especie no como dueña y señora sino como compañera; participamos en una asociación callada e incontrovertible con los organismos fotosintéticos que nos nutren, los productores de gas que nos proporcionan oxígeno, las bacterias heterotrofas y los hongos que eliminan y transforman nuestros desechos. Ningún designio político ni ningún avance tecnológico es capaz de disolver esta asociación.

Otro signo de esta clase inequívoca de grandeza conocida

es nuestro compromiso en un proyecto que, por lo que sabemos, podría muy bien perdurar más que nuestra propia especie: la introducción de biosferas[4] en otros planetas y en el espacio exterior. Estas actividades expansivas parecen indudablemente una manera de reproducción del sistema vivo planetario —el verdadero nexo de comportamiento fisiológico de toda forma de vida en la Tierra—. La expansión y la reproducción de la biosfera, la producción de ecosistemas materialmente cerrados y energéticamente abiertos en la Luna, en Marte y aún más allá, dependen de la humanidad en su más amplio sentido como un fenómeno tecnológico y planetario. David Abram, un filósofo de la State University of New York, en Stoney Brook, ha hablado de la humanidad que «incuba» tecnología. Una actitud egoísta y un exagerado sentido de nuestra propia importancia pueden haber estimulado el aumento de tecnología y de población humana a expensas de otros organismos. Sin embargo, ahora, una vez superado el periodo de «incubación», se nos revela el sentido «gaiano» de la tecnología; se trata de un fenómeno no humano, a pesar de que haya mediado en él la especie humana, y su aplicación consiste en expandir la influencia de la vida en la Tierra, no únicamente de la humanidad.

En *Microcosmos* rememoramos la historia evolutiva desde la nueva perspectiva de las bacterias. Estos organismos, de manera individual o en agregados multicelulares, de escaso tamaño y con una enorme influencia en el ambiente, fueron los únicos habitantes de la Tierra desde el origen de la vida, hace casi 4000 millones de años, hasta que se originaron las células nucleadas unos dos mil millones de años más tarde. Las primeras bacterias eran anaeróbicas: se envenenaron con el oxígeno que algunas de ellas liberaban como producto residual. Respiraban en una atmósfera que contenía compuestos energéticos como el sulfuro de hidrógeno y el metano. Desde la perspectiva microcósmica, la existencia de las plantas y de los animales, incluida la especie humana, es reciente; podría tratarse de fenómenos pasajeros en un mundo microbiano mucho

más antiguo y fundamental. Dos mil millones de años antes de que surgiera cualquier animal o planta ya existían microorganismos simbióticos consumidores de energía, que eran depredadores, tenían capacidad de nutrición, movimiento, mutación, recombinación sexual, fotosíntesis, reproducción y podían proliferar desmesuradamente.

¿Qué es el ser humano? ¿Y la Tierra? ¿Qué relación existe entre ambos, si es que se trata realmente de dos cosas distintas? *Microcosmos* plantea estos amplios interrogantes desde la perspectiva particular de un planeta cuya evolución ha sido principalmente un fenómeno bacteriano. Creemos que esta perspectiva, poco tenida en cuenta con anterioridad, es muy útil, incluso esencial, para compensar la visión antropocéntrica tradicional que sobrevaloraba de manera inapropiada a la especie humana. Puede que, en última instancia, la nuestra haya sido una compensación excesiva. En la práctica filosófica que se conoce como «desconstrucción», se desmantelan oposiciones jerárquicas poderosas mediante un proceso dual que Jacques Derrida caricaturiza o caracteriza como «inversión y desplazamiento». Dicho proceso se ha llevado a cabo en *Microcosmos:* la humanidad es desconstruida al invertir la jerarquía tradicional que situaba a los humanos, surgidos recientemente, en la cúspide de la evolución y a los organismos «inferiores», más antiguos, por debajo. *Microcosmos* ha destronado a la especie humana al mostrar la inmensa importancia evolutiva y ecológica de los «más inferiores» entre los organismos de pequeño tamaño, las bacterias. Pero desde el punto de vista de la práctica deconstrutiva, *Microcosmos,* que invierte la oposición jerárquica, no continúa con lo que sería el siguiente paso: desplazar a los humanos de la máxima categoría para situarlos en la parte más baja de la evolución. Lo que en última instancia ha de cuestionarse no es la posición asumida por nuestra especie en la oposición humanos/naturaleza, sino las distorsiones en oposición impuestas por la misma jerarquía. (Una materia de interés aún más limitado para la deconstrucción, pero de interés aparente para el mismo Derrida, es la jerarquía humanidad/animalidad.) Si tuviéramos que escribir *Microcosmos* de

nuevo, podríamos corregir la ingenuidad de esta inversión que —como el cuento que acaba mostrando al emperador como un necio— altera nuestras convenciones, pero sólo tímidamente, sin llegar realmente a desmantelarlas. Casi todos los que nos han precedido han creído que la especie humana tiene una importancia inmensa, ya sea material o trascendental. Nosotros entendemos la humanidad como un fenómeno microbiano más entre muchos otros, y al nombrar a nuestra especie como *Homo insapiens* hemos querido tener presente que debemos rechazar la idea tan frecuente de que todos los humanos dominan o pueden dominar a Gaia. La visión microbiana es, en el fondo, provisional; no existe una dicotomía absoluta entre los humanos y las bacterias. *Homo insapiens,* un nombre más humilde, nos parece más adecuado, y en cierto modo más «socrático». Por lo menos sabemos, como el filósofo griego, que nada sabemos.

El aludido debate promovido por *Harper's* presentó una diversidad de caracterizaciones de la relación existente entre «ser humano» y «naturaleza». Los editores nos informaron de que, a pesar del enunciado «Sólo la presencia humana puede salvar la naturaleza», una de las contribuciones más significativas al debate sobre el estatus de la humanidad fue la que se tituló «La naturaleza ha llegado a su fin». En *Microcosmos* nos hemos mostrado contrarios a la postura que contrapone los seres humanos al resto de la «naturaleza». Los humanos no estamos fundamentalmente en conflicto con la naturaleza, ni somos esenciales para el ecosistema global. Si algún día se lleva a cabo la expansión de la vida más allá de la Tierra, no será para hacer honor a la humanidad como tal *humanidad.* Más bien será para acreditar a la humanidad como un sistema en evolución simbiótica que se basa en los microorganismos, está reforzado tecnológicamente y se encuentra interconectado de manera global. A la larga, los mapaches podrían también manufacturar y lanzar sus ecosistemas como biosferas espaciales, estableciendo sus rostros de bandido con antifaz en otros planetas, como una avanzada de un extraño caldo de cultivo de Gaia. Quizá no sean los mapaches blanquinegros, sino diáfanos fragmentos del sistema nervioso humano —tan evolucio-

nados que será imposible reconocerlos— los que, en forma de componentes orgánicos de máquinas reproductoras, puedan sobrevivir más allá de la inevitable explosión y muerte del Sol. Nuestro retrato microcósmico de *Homo sapiens sapiens* como una especie de lodo glorificado tiene el mérito de recordarnos nuestro origen bacteriano y nuestras conexiones con una biosfera aún más bacteriana.

Según un antiguo prejuicio metafísico, un axioma de la filosofía occidental ligeramente camuflado, suele considerarse a los seres humanos separados radicalmente de los demás seres vivos. Descartes sostenía que los animales no humanos carecían de alma. Durante siglos los científicos han afirmado que el pensamiento, el lenguaje, el uso de herramientas, la evolución cultural, la escritura y la tecnología distinguían inequívocamente a los humanos de otras formas de vida «inferiores». Retrocediendo tan sólo a 1900, William McKibben, escritor naturalista, expresó que «en nuestras mentes modernas, naturaleza y sociedad humana son cosas distintas... esta naturaleza separada... es real. Resulta hermoso decir, como han hecho algunos poetas y biólogos, que hemos de aprender a encontrar nuestro lugar en la naturaleza, y a reconocer que no somos más que una especie entre otras muchas... Pero en el fondo nadie acaba de creérselo».[5] Quizás esta autoglorificación antropocéntrica haya estimulado a nuestros antepasados, y les haya dado la seguridad de «crecer y multiplicarse» para precipitarse hasta el lugar en que nos encontramos ahora, en el borde mismo de un cambio puntual en el clima global, acompañado de extinciones en masa y de una transformación en la «geofisiología» de Gaia.

Existe la creencia general de que Darwin, al aportar las pruebas de la teoría de la evolución a partir de la selección natural, hizo caer a la especie humana del pedestal en que se hallaba, haciendo innecesaria la idea de un dios creador y haciéndonos sentir incómodos en compañía de otros animales al hacer público el tabú de nuestro origen común con los monos. A menudo se ha comparado la revolución darwiniana con la de Copérnico, que demostró que la Tierra no era el centro del universo, sino una simple mota de polvo en un rincón de esa

tela de araña que es nuestra galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, desde el punto de vista de la filosofía, la revolución darwiniana distó mucho de destruir nuestra relación especial como una forma de vida única, como la especie elegida por Dios, hecha a su imagen y relacionada con los ángeles y los santos. Lo que parece haber ocurrido con el despertar de la revolución darwiniana es que nuestra especie, *Homo sapiens sapiens* es decir «hombre sabio, sabio», ha reemplazado a Dios. Ya no somos los compañeros más jóvenes, los segundos en el mando. El darwinismo puede haber destruido la deidad antropomórfica de la religión tradicional, pero en vez de hacernos sentir humildes al considerarnos hermanos de los protoctistas y de las demás formas de vida (plantas, hongos, bacterias y otros animales), despertó nuestra avidez por ocupar el lugar que Dios había desempeñado hasta entonces. Los humanos asumieron la posición de dirigentes divinos de la vida en la Tierra, diseñando de manera ambiciosa tecnologías a escala planetaria y, poco después, gestionando el mundo.

Aunque pueda sorprender a quienes no están familiarizados con el funcionamiento de los sistemas retroactivos, esa actitud de autoservicio que representa la glorificación humana a expensas de otras especies ya no nos sirve. Nuestro autocentrismo extremo y la sobrepoblación del planeta han causado una catástrofe ecológica a gran escala, y la mayor amenaza se cierne sobre nuestra especie. La perspectiva religiosa tradicional —que se ha mantenido, como hemos visto, incluso en el darwinismo, que no tiene nada de religioso— sostiene que el ser humano es algo distinto, único y superior. Esa es la actitud de la arrogancia ecológica. La perspectiva de *Microcosmos* difiere en cuanto que es una ecología profunda, una variante especial de la visión ecológica del mundo. En relación a la búsqueda del origen de la palabra *humano,* que Lewis Thomas lleva a cabo en la presentación de este libro, hemos de decir que *Microcosmos* propugna una actitud de *humildad* ecológica. Al narrar la historia de la vida desde la posición ventajosa de los microorganismos, *Microcosmos* invierte diametralmente la jerarquía normal: al afirmar que el sistema biológico planetario no tiene ninguna necesidad de la especie hu-

mana, que la humanidad es un epifenómeno puntual de la antigua recombinación esencial de microorganismos, puede que hayamos exagerado. El problema con esta inversión, que coloca a los microorganismos en lo más alto y a los humanos por debajo de ellos, es que mantiene las dicotomías importante/no importante y esencial/no esencial. Woody Allen dijo en cierta ocasión que él siempre ponía a su esposa *debajo* de un pedestal. Enfrentándonos a nuestra arrogancia ecológica no se resuelve el problema del pedestal; seguimos dando por sentado que un organismo es mejor, superior o «más evolucionado» que otro. Para deconstruir nuestra actitud destructiva de arrogancia ecológica es necesario que nos situemos en la parte inferior. De todos modos, cuando reconozcamos nuestro intercambio de energía y de substancias químicas con otras especies, así como la imposibilidad de negociar nuestras relaciones con ellas, no nos quedará más remedio que eliminar el pedestal.

Tras el intento hecho en *Microcosmos* de llevar hasta el límite la «copernicana» revolución darwinista, el libro destacó la importancia de la simbiosis en la historia de la vida. Desde que se publicó la primera edición, se han ido acumulando más pruebas que confirman que la simbiosis, es decir, la convivencia o incluso unión de diferentes especies de organismos, ha sido crucial en la evolución de las diferentes formas de vida existentes en la Tierra. Los ejemplos más claros de simbiosis —los cloroplastos de todos los vegetales y las mitocondrias de todos los animales, que en ambos casos habían sido antes bacterias independientes— están muy bien detallados en *Microcosmos*. Pero ahora la simbiosis parece ser especialmente adecuada para explicar «saltos» evolutivos de importancia ecológica trascendental. Los peces que viven en el fondo del mar, capaces de iluminar aquellas aguas tenebrosas, pueden haber evolucionado de muchísimas maneras, estimulados por manchas oculares o por órganos luminosos situados en el esófago o en la región anal, zonas en las que se albergarían relucientes bacterias simbióticas.[6] Se conocen muchos casos de peces

y de escarabajos que albergan bacterias que brillan en la oscuridad.

Otro ejemplo de investigación reciente sobre simbiosis indica que la transición de las algas verdes a las plantas terrestres se hizo a partir de la unión de genomas (material genético) de un hongo con algún ancestro de alga verde. Los líquenes son productos de simbiosis muy bien conocidos. Todos ellos son hongos en simbiosis con cianobacterias u hongos en simbiosis con algas verdes. Los dos tipos de vida —fotosintética y heterótrofa— se entremezclan para formar un nuevo organismo con aspecto de planta que puede alcanzar gran longevidad: el liquen. La extraordinaria capacidad que presentan los líquenes para crecer en la superficie desnuda de las rocas depende de la simbiosis, de los dos componentes —hongo y organismo fotosintético— que se combinan a la par para formar la entidad única que es el liquen. Recientemente ha surgido la idea de que las plantas vasculares —incluyendo hierbas, arbustos y todos los árboles— podrían haber sido en sus orígenes líquenes «del revés». Su evolución puede haber implicado la colaboración de especies muy distintas de diferenters reinos de la naturaleza. Si la teoría del profesor Peter Atsatts es cierta,[7] la unión interactiva entre dos organismos distintos, hongos y algas verdes, explicaría no sólo la aparición de entidades menores en los recovecos de la evolución, sino la evolución trascendental del reino vegetal, al que pertenecen los mismos árboles.

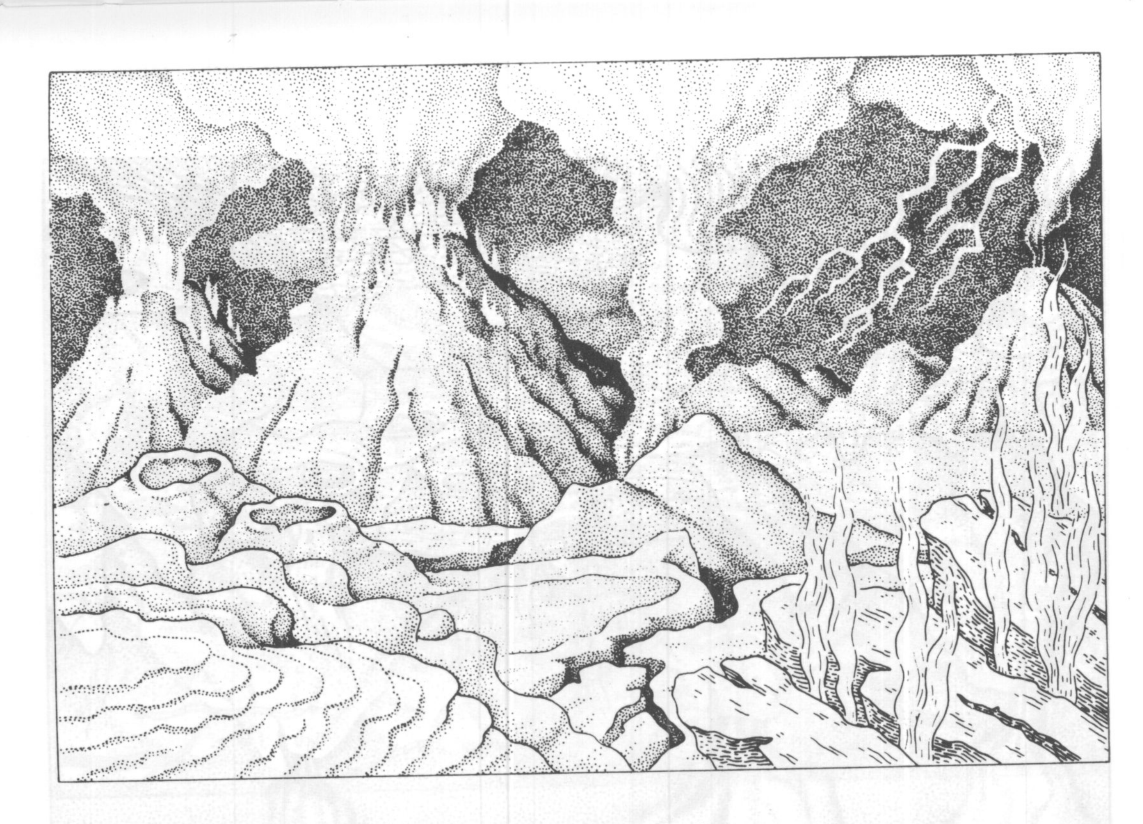
La ilusión de considerar el ser humano independiente de la naturaleza es un caso peligroso de ignorancia. Una línea continua de vida, sin fragmentación, existe ahora y ha existido desde el inicio de la vida misma —a través de los cuatro mil millones de años del tiempo darwiniano y de los aproximadamente veinticinco kilómetros de espesor del anillo que se extiende desde diez kilómetros por debajo de la superficie marina hasta diez kilómetros por encima, en lo más alto de la troposfera, constituyendo lo que se conoce como el espacio de Vernadski. Todos los organismos estamos comprendidos en este sistema vivo; escapar a él equivale a morir. Emily Dickinson, que notó «qué misterio se difunde por un pozo»,[8] describió de manera encan-

tadora a los humanos y la naturaleza. Resulta adecuado citarla antes de iniciar nuestro descenso hacia el microcosmos:

> Pero la naturaleza es como un ser extraño;
> aquellos que hablan más de ella
> nunca han pasado junto a su casa encantada,
> ni han simplificado su fantasma.
> A tener piedad de los que no la conocen
> nos ayuda el pesar de saber
> que aquellos que la conocen
> la conocen aún menos
> cuanto más cerca están de ella.[9]

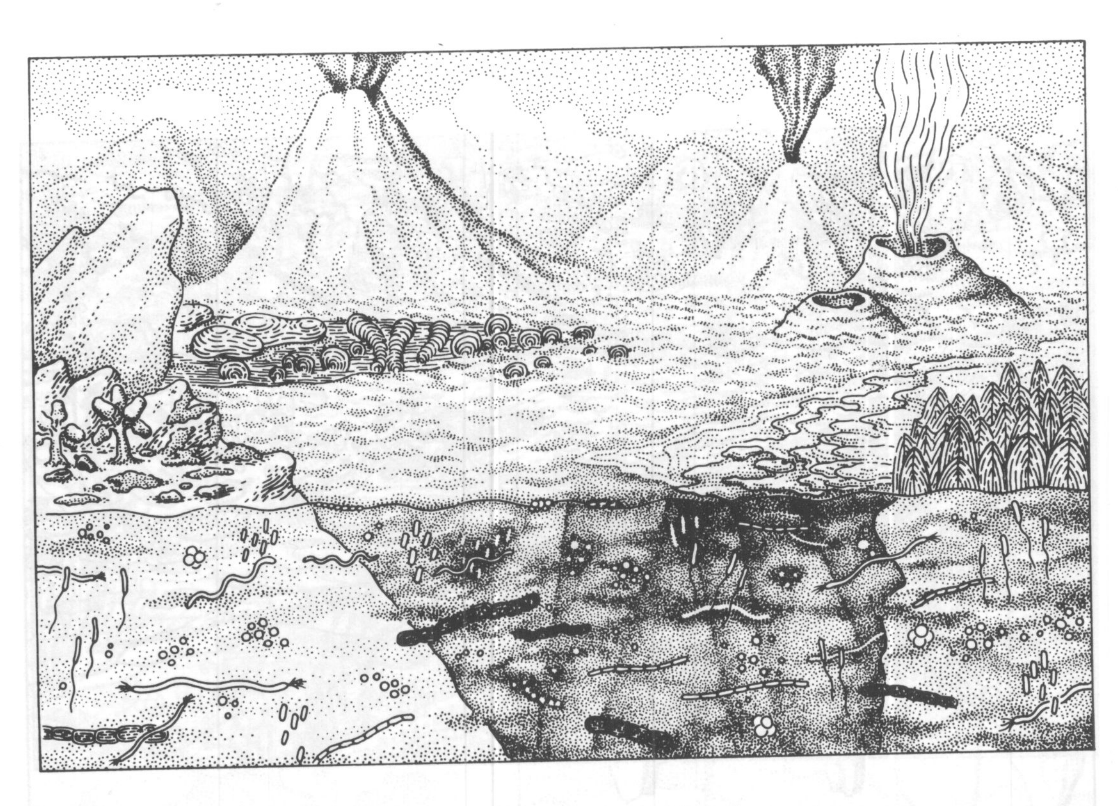
Dorion Sagan y Lynn Margulis
Enero de 1991

El microcosmos en expansión: una visión previa ilustrada



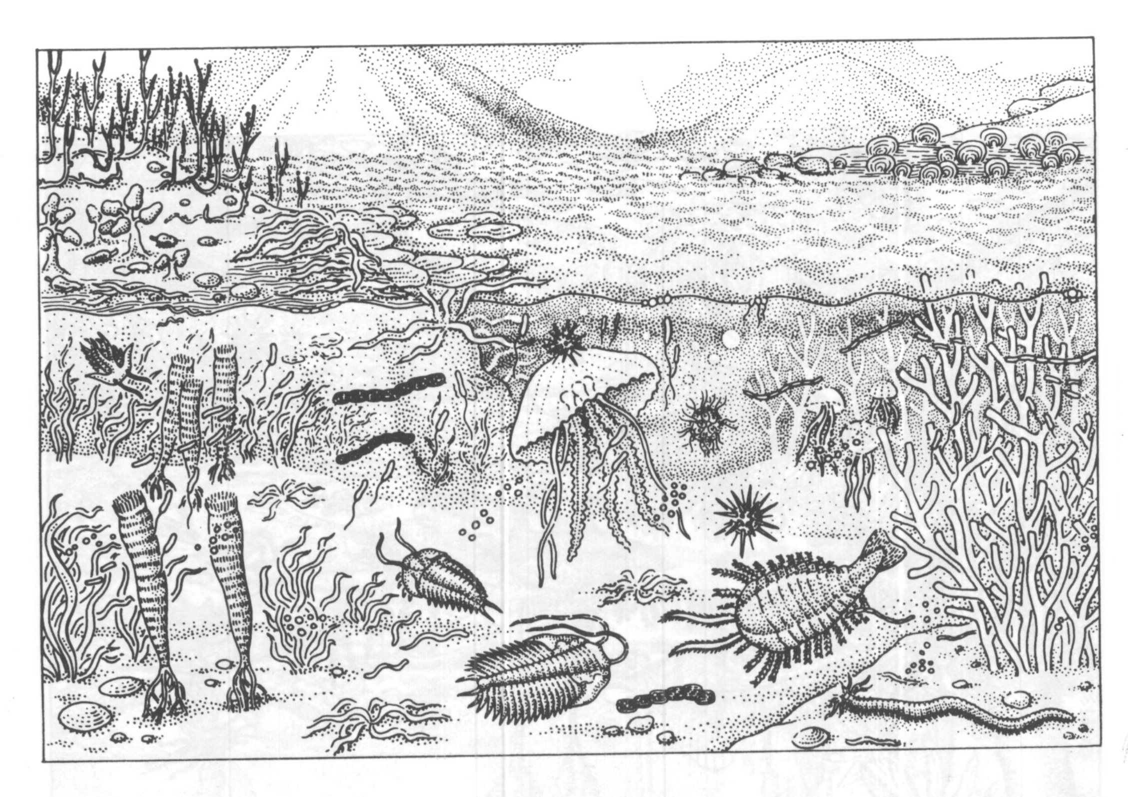
Hace 4000 millones de años: Eón Hadeense
El microcosmos surge de la rocalla de la explosión de la supernova

Hace 3000 millones de años: Eón Arqueense
Los microbios que se desarrollan atrapan minerales y forman capas rocosas en los océanos de aguas poco profundas

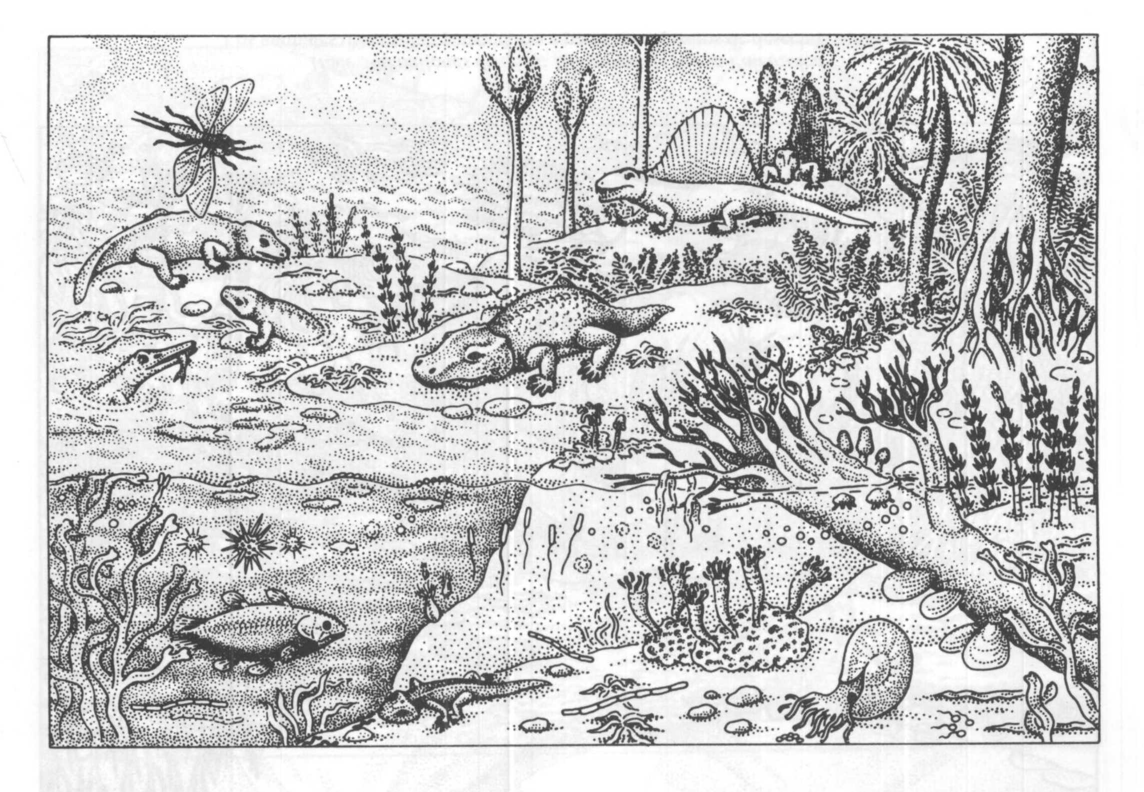


Hace 2000 millones de años: Principios del Eón Proterozoico
El peligroso oxígeno se acumula en la atmósfera como resultado de la fotosíntesis bacteriana

Hace 700 millones de años: Finales del Eón Proterozoico
Animales marinos de cuerpo blando invaden el imperio de los microorganismos

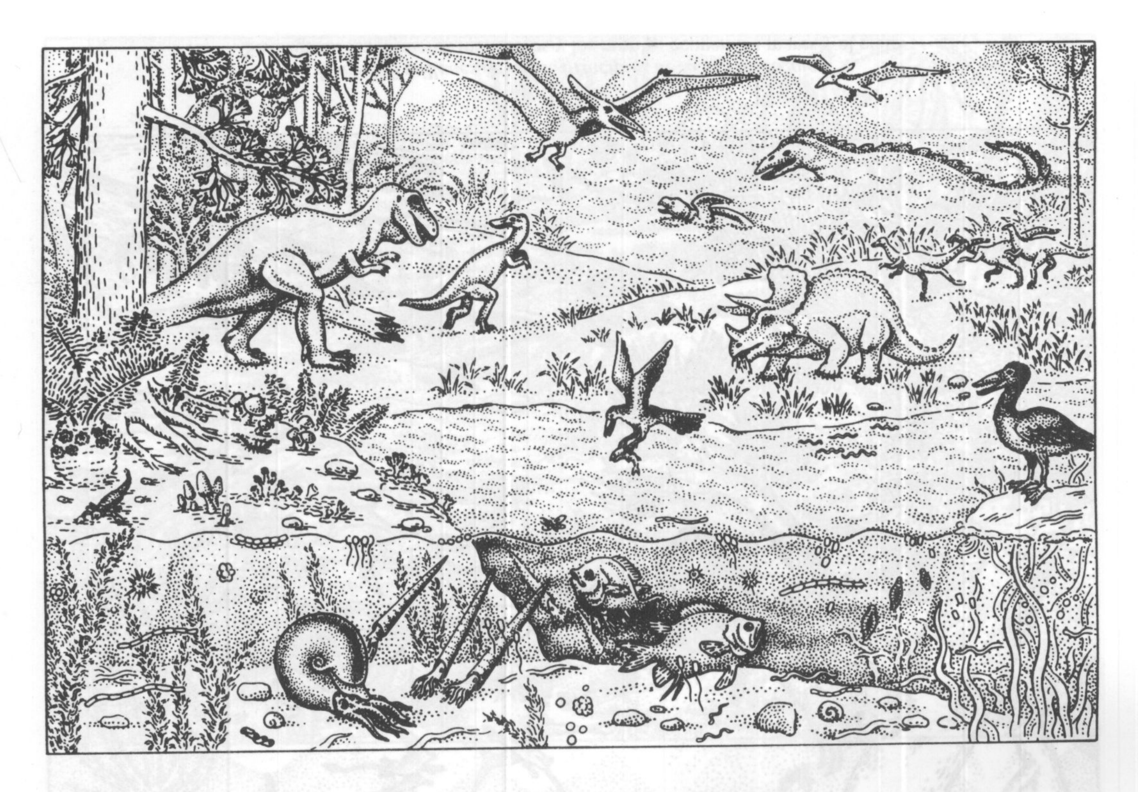


Hace 500 millones de años: Principios de la era Paleozoica
Los animales desarrollan partes duras a partir de depósitos de desechos celulares



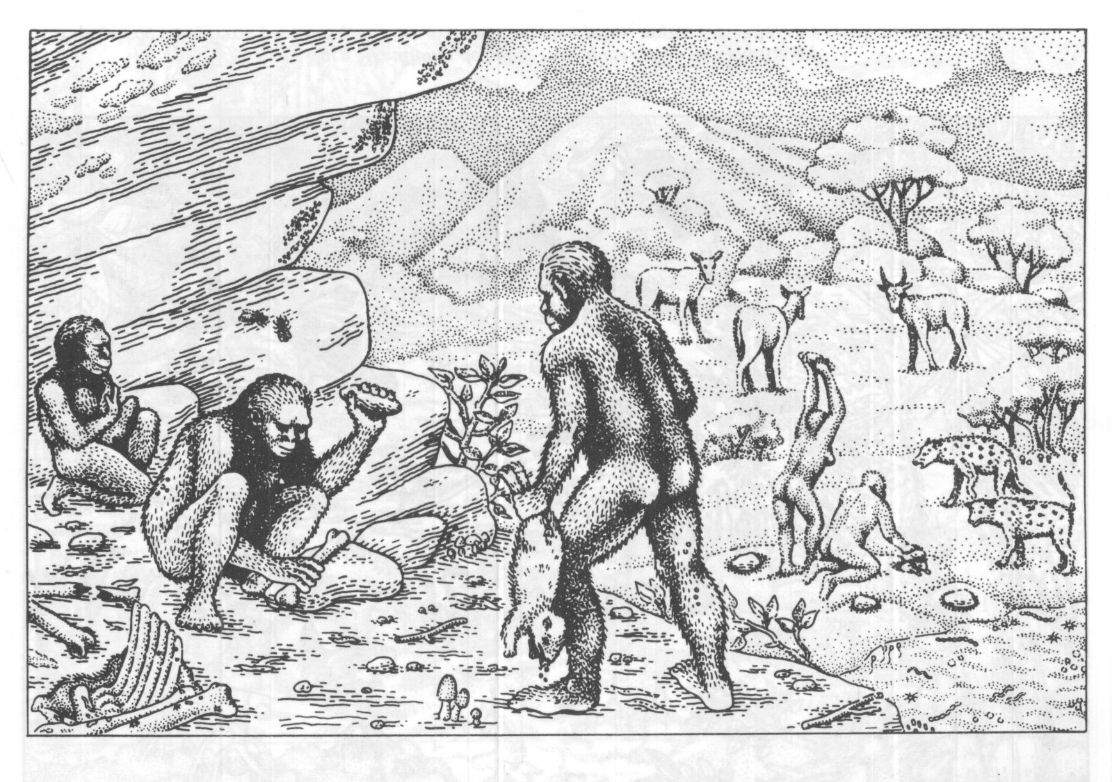
Hace 300 millones de años: Finales de la era Paleozoica
Los microorganismos alcanzan tierra firme en los intestinos de los animales que se desplazan

Hace 200 millones de años: Principios de la era Mesozoica
Se originan los primeros mamíferos y los reptiles ocupan los mares y el cielo



Hace 70 millones de años: Finales de la era Mesozoica
El microcosmos se expande: reptiles gigantes, grandes bosques y acantilados calizos hechos de cubiertas microbianas

Hace 50 millones de años: Principios de la era Cenozoica
Equipos de mamíferos y microorganismos avanzan hacia los polos, trepan a los árboles y escalan las altas montañas



Hace 3 millones de años: Finales de la era Cenozoica
Los hombres-mono, cuyo sistema nervioso deriva de multitudes de bacterias, utilizan herramientas

Tiempo presente: Eón Fanerozoico
La tecnología lleva el microcosmos hasta el cosmos

Introducción

Cuando contemplamos la vida en la Tierra es fácil pensar que somos supremos. El poder de nuestra conciencia, de nuestra sociedad y de nuestros descubrimientos técnicos nos ha hecho pensar que somos la forma de vida más avanzada del planeta. Ni siquiera la enorme oscuridad del espacio nos hace sentir humildes. Vemos este espacio como una tierra de nadie que queremos penetrar y conquistar, del mismo modo que hemos conquistado la Tierra.

Tradicionalmente se ha estudiado la vida en la Tierra como un prólogo de la humanidad: formas de vida «inferiores» y carentes de inteligencia nos han precedido y ahora nos encontramos en la cúspide de la evolución. Hasta tal punto nos consideramos semidioses, que llegamos a creer que estamos tomando el mando de la evolución al poder manipular el DNA, fuente de vida, y dirigirlo según nuestros designios. Estudiamos el microcosmos, el antiquísimo mundo de los microorganismos, para descubrir en él los mecanismos secretos de la vida. De ese modo podremos controlar mejor, quizás incluso perfeccionar, a todos los seres vivos de la Tierra, incluyendo a nuestra propia especie.

Pero durante las últimas décadas se ha producido una revolución en las ciencias de la vida. Las pruebas fósiles de la existencia de vida microbiana primitiva, la decodificación del DNA y los descubrimientos en relación a la composición de

nuestras propias células han hecho saltar por los aires las ideas establecidas sobre el origen de la vida y la evolución en la Tierra.

Ante todo, nos han mostrado la insensatez de considerar el ser humano como especial, totalmente distinto y supremo. El microscopio ha ido mostrando gradualmente la inmensidad del microcosmos y ahora nos proporciona una visión sobrecogedora de nuestro verdadero lugar en la naturaleza. Ahora parece ser que los microbios (llámeseles microorganismos, gérmenes, protozoos o bacterias, según el contexto), además de ser los cimientos de la vida en la Tierra, ocupan un lugar indispensable en toda estructura viva y son necesarios para su supervivencia. Desde el paramecio hasta el género humano, todas las formas de vida son complicados agregados meticulosamente organizados de vida microbiana en evolución. Los microorganismos, lejos de haberse detenido en un peldaño inferior de la escala evolutiva, forman parte de nuestro entorno y de nuestro propio organismo. Tras haber sobrevivido a lo largo de una línea ininterrumpida desde los comienzos de la vida, todos los organismos han alcanzado en la actualidad un mismo nivel de evolución.

Esta constatación revela claramente el engreimiento y presunción de tratar de medir la evolución por una progresión rectilínea desde lo más simple (llamado «inferior») a lo más complejo (con el ser humano como forma «superior» absoluta, en lo más alto de la jerarquía). Como veremos, los organismos más simples y más antiguos no sólo son los antepasados y el substrato actual de la biota terrestre; también están preparados para expandirse y modificarse a sí mismos y a las demás formas de vida, en el caso de que nosotros, los organismos «superiores», fuéramos tan insensatos que llegásemos a nuestra propia aniquilación.

Además, la visión de la evolución como una lucha crónica y encarnizada entre individuos y especies, distorsión popular de la idea darwiniana de la «supervivencia de los mejor dotados», se desvanece con la nueva imagen de cooperación continua, estrecha interacción y mutua dependencia entre formas de vida. La vida no ocupó la Tierra tras un combate, sino extendiendo una red de colaboración por su superficie. Las formas de vida se multiplicaron y se hicieron cada vez más complejas, integrándose con otras, en vez de hacerlas desaparecer.

Al no poder observar a simple vista el microcosmos tendemos a menospreciar su importancia. Sin embargo, de los tres mil millones y medio de años que la vida lleva existiendo sobre la Tierra, la completa historia de la humanidad, desde la vida de las cavernas hasta el moderno apartamento de nuestros días, representa bastante menos del uno por ciento de todo este tiempo. La vida en la Tierra no sólo se originó en un primer momento de su historia como planeta, sino que durante los primeros dos mil millones de años sus únicos habitantes fueron exclusivamente microorganismos bacterianos.

En realidad, tan importantes son las bacterias, y tan importante es su evolución, que la división fundamental de los seres vivos en la Tierra no es la tradicionalmente supuesta entre plantas y animales, sino entre procariontes (organismos constituidos por células sin núcleo, es decir, las bacterias) y eucariontes (todas las demás formas de vida).[10] En sus primeros dos mil millones de años los procariontes transformaron continuamente la superficie de la Tierra y la atmósfera. Fueron los inventores, a escala reducida, de todos los sistemas químicos esenciales para la vida, cosa que el ser humano está aún lejos de conseguir. Esta antigua y elevada *bio*tecnología condujo al desarrollo de la fermentación, de la fotosíntesis, de la utilización del oxígeno en la respiración y de la fijación del nitrógeno atmosférico. También fue la causa de diversas crisis de hambre, contaminación y extinción a escala planetaria mucho antes de que se vislumbraran formas de vida de mayor tamaño.

Estos sorprendentes acontecimientos en la temprana historia de la vida sucedieron por la interacción, como mínimo, de tres mecanismos distintos de evolución descubiertos recientemente. El primero es la notable capacidad de orquestación del DNA, substancia que fue identificada como transmisora de la herencia en 1944 por Oswald T. Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty. El código genético fue desvelado en los años se-

senta a partir del descubrimiento de la duplicación del DNA, en 1953, por James Watson y Francis Crick. Regida por el DNA, la célula viva puede hacer una copia de sí misma, desafiando a la muerte y manteniendo su identidad por medio de la replicación. Sin embargo, al ser también susceptible de mutación, que juega al azar con su identidad, la célula es capaz de sobrevivir al cambio.

Una segunda vía evolutiva consiste en algo parecido a la ingeniería genética, y es un proceso del que desde hace tiempo se han ido acumulando pruebas en el campo de la bacteriología. Desde hace unos cincuenta años, los científicos han observado que los organismos procariotas transfieren, de manera rutinaria y muy deprisa, distintos fragmentos de su material de unos individuos a otros. Cualquier bacteria puede, en un momento determinado, usar genes accesorios procedentes de cepas a veces muy distintas que realizan funciones que su propio DNA puede no abarcar. Algunos de los fragmentos de material genético se recombinan con los genes propios de la célula; otros son transferidos de nuevo a otras células. Algunos de los fragmentos genéticos pueden acabar también instalándose en el aparato genético de las células eucarióticas.

Estos intercambios son un hecho normal en el repertorio bacteriano. Pero aún hoy en día muchos bacteriólogos no alcanzan a comprender toda su importancia: el que, como consecuencia de esta capacidad, las bacterias de todo el mundo tengan en esencia acceso a una única reserva de genes y, por tanto, a los mecanismos adaptativos de todo el reino bacteriano. La velocidad de recombinación es superior a la de mutación; los organismos superiores podrían llegar a tardar un millón de años en adaptarse a un cambio a escala mundial que las bacterias pueden conseguir en unos pocos años. Por medio de constantes y rápidas adaptaciones a las condiciones ambientales, los organismos del microcosmos son el pilar en que se apoya la biota entera, ya que su red de intercambio global afecta, en última instancia, a todos los seres vivos. El ser humano está precisamente aprendiendo estas técnicas a través de la ciencia de la ingeniería genética, por medio de la

cual obtiene productos bioquímicos al introducir genes ajenos dentro de células en reproducción. Pero los organismos procariotas han estado utilizando estas «nuevas» técnicas durante miles de millones de años. El resultado es un planeta que ha llegado a ser fértil y habitable para formas de vida de mayor tamaño gracias a una supraorganización de bacterias que han actuado comunicándose y cooperando a escala global.

A pesar de su gran trascendencia, la mutación y el intercambio genético no bastan para explicar la evolución de todas las formas de vida que existen actualmente en la Tierra. En uno de los más fascinantes descubrimientos de la moderna microbiología, la observación de las mitocondrias (inclusiones de membrana fina que se encuentran en el interior de las células de animales, plantas, hongos y protistas, siempre con una estructura similar) proporcionó la pista de una tercera vía evolutiva. Aunque en las células modernas las mitocondrias se encuentran fuera del núcleo, poseen sus propios genes compuestos por DNA. Además, se reproducen por división binaria, a diferencia de las células en las que residen, y lo hacen en momentos distintos al de la división del resto de la célula. Sin mitocondrias, las células con núcleo, y por consiguiente la planta o el animal entero, no podrían vivir porque serían incapaces de utilizar el oxígeno.

Conjeturas hechas posteriormente han llevado a los biólogos a imaginar una sorprendente teoría: los descendientes de las bacterias que hace tres mil millones de años nadaban en las aguas primitivas respirando oxígeno se hallan actualmente presentes en nuestro cuerpo en forma de mitocondrias. En algún momento, las bacterias ancestrales debieron de combinarse con otros microorganismos, instalándose en su interior y proporcionándoles un sistema de eliminación de desechos y energía procedente del oxígeno a cambio de alimento y cobijo. Los organismos resultantes de esta fusión habrían evolucionado hacia formas de vida más complejas, incorporando la respiración del oxígeno. Este sería un mecanismo evolutivo más brusco que la mutación: una unión simbiótica que llega a ser permanente. Al crearse organismos que no son simplemente la suma de sus partes componentes, sino algo más, como la

suma de todas las combinaciones posibles de cada una de sus partes, estas alianzas conducen a los seres en evolución hasta esferas inexploradas. La simbiosis, la unión de distintos organismos para formar nuevos colectivos, ha resultado ser la más importante fuerza de cambio sobre la Tierra.[11]

Al examinar nuestra propia especie como el producto de una simbiosis llevada a cabo a lo largo de millones de años, la prueba que confirma nuestra ascendencia multimicrobiana se hace abrumadora. Nuestros cuerpos contienen la verdadera historia de la vida en la Tierra. Nuestras células conservan un medio ambiente rico en carbono e hidrógeno, como el de la Tierra en el momento en que empezó la vida en ella. Además, viven en un medio acuático cuya composición salina semeja la de los mares primitivos. Hemos llegado a ser lo que somos gracias a la unión de bacterias asociadas en un medio acuático. Aunque la dinámica evolutiva del DNA, la transferencia genética y la simbiosis no fueron descubiertas hasta casi cien años después de la muerte de Charles Darwin en 1882, éste fue lo suficientemente perspicaz como para escribir: «No podemos desentrañar la maravillosa complejidad de un ser vivo; pero en la hipótesis que hemos avanzado, esta complejidad se ve aumentada. Todo ser vivo debe ser contemplado como un microcosmos, un pequeño universo formado por una multitud de organismos inconcebiblemente diminutos, con capacidad para propagarse ellos mismos, tan numerosos como las estrellas en el cielo».[12] Este libro trata precisamente de la extraña naturaleza de ese pequeño universo.

La estructura detallada de nuestras células revela los secretos de sus antepasados. Las imágenes que el microscopio electrónico proporciona de las células nerviosas de todos los animales muestran numerosos «microtúbulos» que llaman la atención. Los cilios ondulantes de las células que revisten nuestra garganta y la cola cimbreante del espermatozoide humano comparten la misma estructura, tan poco corriente, dispuesta como el disco de un teléfono, igual que los cilios de los ciliados, un próspero grupo de microbios que incluye más de ocho mil especies. Estos mismos microtúbulos están presentes en todas las células de plantas, animales y de hongos

cada vez que se dividen. Y están constituidos, enigmáticamente, por una proteína casi idéntica a otra hallada en el cerebro humano. Se trata de una proteína sumamente parecida a algunas encontradas en ciertas bacterias muy móviles con forma de sacacorchos.

Estos microtúbulos y otros vestigios vivientes de lo que fueran en algún momento organismos separados han sido detectados en diversas especies, lo que demuestra, cada vez con mayor certeza, que todos los organismos visibles evolucionaron por medio de simbiosis, unión que conduce a un beneficio mutuo al compartir permanentemente células y cuerpos. Aunque, como se verá, algunos detalles del origen bacteriano de las mitocondrias, microtúbulos y otros componentes celulares son difíciles de explicar, las ideas generales que indican cómo puede producirse la evolución por simbiosis son compartidas por todos aquellos científicos que están familiarizados con los tipos de vida del microcosmos.

El proceso simbiótico prosigue sin cesar. Los humanos, organismos del macrocosmos, continuamos la interacción recíproca con el microcosmos y seguimos dependiendo los unos de los otros. Algunas familias de vegetales (por ejemplo, las leguminosas, que incluyen guisantes, judías y especies afines como el trébol y la algarroba) no pueden vivir en suelos pobres en nitrógeno sin las bacterias fijadoras de dicho elemento, que se desarrollan en los nódulos de sus raíces; y nosotros no podemos vivir sin el nitrógeno que procede de dichas plantas. De igual manera, las vacas no pueden digerir la celulosa de la hierba, ni las termitas la que procede de la madera, sin las comunidades microbianas que se alojan en el aparato digestivo, tanto de los rumiantes como de las termitas. Un diez por ciento, como mínimo, del peso seco de nuestro cuerpo corresponde a bacterias, algunas de las cuales son esenciales para nuestra vida, a pesar de que no sean parte congénita de nuestro organismo. Esa coexistencia no es un mero capricho de la naturaleza, sino que constituye la misma esencia de la evolución. Si dejásemos proseguir la evolución durante algunos millones de años más, esos microorganismos que producen vitamina B_{12} en nuestro intestino podrían llegar a formar parte de

nuestras propias células. Un agregado de células especializadas puede convertirse en un órgano. En el laboratorio se ha llegado a observar la unión de amebas con una bacteria que antes era letal y se ha obtenido, así, una nueva especie de ameba híbrida.

Esta revolución en el estudio del microcosmos nos brinda una perspectiva asombrosa. No es disparatado decir que la misma consciencia que nos permite investigar el funcionamiento de nuestras células puede provenir de las capacidades coordinadas de millones de microorganismos que evolucionaron simbióticamente hasta convertirse en el cerebro humano. Ahora esta consciencia nos lleva a manipular el DNA y hemos empezado a intervenir en el antiguo proceso de la transferencia genética entre bacterias. Nuestra capacidad de obtención de nuevos tipos de vida puede ser considerada el mecanismo más nuevo por medio del cual la memoria orgánica (recuerdo de la vida y activación del pasado en el presente) se agudiza más. En uno de los enormes bucles retroactivos de la vida que hacen referencia a sí mismos, los cambios que han tenido lugar en el DNA nos han procurado la consciencia que nos permite ahora modificar el propio DNA. Nuestra curiosidad, nuestra sed de conocimiento, nuestro entusiasmo por penetrar el espacio y llegar a alcanzar otros planetas, y aún más allá, representa un aspecto de las estrategias que la vida tiene para su expansión, que empezó hace más de tres mil millones de años. No somos más que el reflejo de una antigua tendencia.

Desde las primeras bacterias primordiales hasta el presente, miríadas de organismos formados por simbiosis han vivido y han muerto. Pero el común denominador microbiano sigue siendo esencialmente el mismo. Nuestro DNA proviene, a través de una secuencia ininterrumpida, de las mismas moléculas que estaban presentes en las células primitivas que se formaron en las orillas de los primeros océanos de aguas cálidas y poco profundas. Nuestros cuerpos, como los de todos los seres vivos, conservan el medio ambiente de la Tierra primitiva. Coexistimos con microorganismos actuales y albergamos, incluidos de manera simbiótica en nuestras propias células, restos de otros. Es así como el microcosmos vive en nosotros y nosotros vivimos en él.

A algunas personas esta idea puede que les moleste y les inquiete. Además de hacer saltar por los aires nuestra presunción de soberanía sobre el resto de la naturaleza, representa un reto para nuestra concepción de la individualidad, unicidad e independencia. Llega a ser una violación de la idea que tenemos de nosotros mismos como organismos físicos diferenciados y separados del resto de la naturaleza. El pensar en nosotros mismos y en nuestro medio ambiente como en un mosaico de vida microscópica en evolución nos hace evocar la imagen de que somos absorbidos, disueltos, aniquilados. Aún es más inquietante la conclusión filosófica a la que llegaremos más adelante respecto a que el posible control cibernético de la superficie de la Tierra por organismos carentes de inteligencia puede poner en duda la supuesta unicidad de la inteligente consciencia humana.

Resulta paradójico que, al ampliar el microcosmos para hallar nuestros orígenes, apreciemos claramente el triunfo y, al mismo tiempo, la insignificancia del individuo. La unidad de vida más pequeña —una simple célula bacteriana— es un monumento de formas y procesos que no tiene rival en el universo tal como lo conocemos. Cada individuo que se desarrolla, que aumenta al doble su tamaño y que se reproduce, representa una historia de gran éxito. Sin embargo, y de la misma manera que el éxito del individuo es asumido por su especie, ésta queda incluida en la trama global de toda clase de vida: un éxito de mayor magnitud aun.

Es fácil, incluso para los científicos, entusiasmarse demasiado ante cualquier empresa que acabe en éxito. Desde los discípulos de Darwin hasta quienes trabajan en ingeniería genética en la actualidad, la ciencia ha popularizado la idea de que los humanos nos hallamos en el peldaño más elevado de la escala evolutiva de la Tierra y que, con la ayuda de la tecnología, nos hemos salido del marco de la evolución. Algunos eminentes científicos han escrito (como Francis Crick en su libro *La vida misma*) que la vida, en general, y la consciencia humana en particular, son algo tan milagroso que es imposible

que hayan tenido su origen en la Tierra y creen que se habría originado en algún otro lugar del universo.[13] Otros llegan a creer que los humanos son el producto de una paternal «inteligencia superior»: los hijos de un patriarca divino.

Este libro ha sido escrito para demostrar que estas teorías menosprecian la Tierra y los caminos de la naturaleza. No existen pruebas de que el ser humano sea el supremo administrador de la vida en la Tierra, ni de que sea el hijo menor de una superinteligente fuerza extraterrestre. Pero existen, en cambio, pruebas para demostrar que somos el resultado de una recombinación de poderosas comunidades bacterianas con una historia de miles de millones de años. Formamos parte de una intrincada trama que procede de la original conquista de la Tierra por las bacterias. La capacidad de inteligencia y de tecnología no pertenece específicamente a la especie humana, sino a todo el conjunto de la vida. Si tenemos en cuenta que las propiedades que son útiles raramente son desdeñadas por la evolución, es muy probable que nuestros poderes, que derivan del microcosmos, perduren en él. La inteligencia y la tecnología, incubadas por la humanidad, son en realidad propiedad del microcosmos. Podrían muy bien sobrevivir a nuestra especie en forma de vidas futuras que sobrepasan los límites de nuestra imaginación.

1
A partir del cosmos



Desde el momento en que consideramos los orígenes a escala cósmica, nos vemos a nosotros mismos como una parte, una minúscula parte, del universo. Esto se debe a que los propios átomos que forman nuestros cuerpos no fueron creados, naturalmente, cuando fuimos concebidos, sino muy poco después del nacimiento del universo mismo.

Se sabe con certeza que la mayoría de estrellas del firmamento se separan unas de otras a velocidades vertiginosas. Si consideramos mentalmente este fenómeno en dirección opuesta nos encontramos con el llamado Big Bang, la hipotética liberación de toda la energía, materia y antimateria existentes. Como cualquier otra visión de lo que Shakespeare llamó «la confusa retrospección y el abismo del tiempo», no debemos tomar al pie de la letra nuestras mejores suposiciones, ni extrapolar al pasado de manera directa las condiciones actuales. Ligeras alteraciones en la más simple suposición pueden conducir a enormes distorsiones al considerar un lapso de tiempo de quince mil millones de años, que es la edad que se supone que tiene el universo actual. Sin embargo, tales extrapolaciones nos ofrecen la mejor imagen que tenemos, tanto del cosmos que precedió a la evolución de la vida en el microcosmos, como del mismo microcosmos y de su inexorable expansión.

Durante el primer millón de años de expansión después del

Big Bang, el universo se enfrió desde una temperatura de 100 000 millones de grados Kelvin (según cálculos del físico Steven Weinberg) hasta unos 3000 grados Kelvin, temperatura a la cual un electrón y un protón pudieron unirse para crear hidrógeno, el elemento más sencillo y abundante en el universo.[14] El hidrógeno se aglomeró en «supernovas», enormes nubes que durante miles de millones de años fueron comprimiéndose desde densidades cósmicas a submicrocósmicas. Sometidos a la fuerza de la gravedad, los núcleos de las supernovas llegaron a calentarse tanto que se desencadenaron reacciones termonucleares que crearon, a partir del hidrógeno y algunas otras partículas subatómicas diferentes, todos los demás elementos más pesados que conocemos hoy en día. Nuestros organismos aún son muy ricos en hidrógeno (tenemos mayor cantidad de átomos de hidrógeno que de cualquier otro elemento), principalmente en forma de agua. Nuestros cuerpos de hidrógeno son el reflejo de un universo de hidrógeno.

Los elementos recién creados se extendieron por el espacio en forma del polvo y el gas que componen las nebulosas galácticas. En el interior de éstas nacieron más estrellas, algunas con planetas que giraban a su alrededor, al atraerse, unas a otras, partículas de polvo y gas, cayendo y concentrándose hasta que se originaron reacciones nucleares. Antes de que la primitiva materia de lo que podría llamarse Tierra se reuniera en el interior de nuestra nebulosa solar, en un brazo externo de la Vía Láctea, ya habían transcurrido de cinco a quince mil millones de años durante los cuales se habían ido formando las estrellas del universo por fenómenos de agregación.

En la nube de gases destinada a formar la Tierra había hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno, oxígeno, hierro, aluminio, oro, uranio, azufre, fósforo y silicio. Los demás planetas de nuestro sistema solar empezaron también como agregados de partículas de polvo y gas. Pero todo este conjunto se habría enfriado y habría ido flotando sin sentido como los detritos de un espacio sin vida, de no haber sido por la enorme estrella que se formó en el centro de la nebulosa. Esta puso en órbita los cuerpos más pequeños que se estaban endureciendo e inició una estable y durarera incandes-

Tabla 1 - ESCALA DEL TIEMPO GEOLOGICO*
(en millones de años hacia atrás)

Inicio del eón	*Eones*	*Eras*	*Periodos*		*Epocas*	
4500	Hadeense	Prefanerozoico	Fechas iniciales y finales para periodos y épocas (en millones de años)			
3900	Arqueense					
2500	Proterozoico					
580	Fanerozoico	Paleozoico 580-245	Cámbrico	580-500		
			Ordovícico	500-440		
			Silúrico	440-400		
			Devónico	400-345		
			Carbonífero	345-290		
			Pérmico	290-245		
		Mesozoico 245-66	Triásico	245-195		
			Jurásico	195-138		
			Cretácico	138-66		
		Cenozoico 66-0	Paleógeno	66-26	Paleoceno	66-54
					Eoceno	54-38
					Oligoceno	38-26
			Neógeno	26-0	Mioceno	26-7
					Plioceno	7-2
					Pleistoceno	2-0,1
0					Reciente	0,1-Actual.

* Sin escala y simplificado

cencia que sumergió a todos sus satélites en continuas emanaciones de luz, gas y energía.

En aquel momento, hace aproximadamente 4600 millones de años, la masa de la Tierra ya estaba en condiciones adecuadas para la aparición de la vida. En primer lugar, estaba cerca de una fuente de energía: el Sol. En segundo lugar, de los nueve planetas mayores que giraban alrededor del Sol, la masa de la Tierra no estaba tan próxima a él como para que sus elementos se hubieran evaporado en forma de gases o licuado como rocas fundidas. Tampoco estaban tan lejos como para que sus gases se congelaran y se encontrasen en forma de hielo, amoníaco y metano, como se encuentran actualmente en Titán, el mayor satélite de Saturno. El agua se encuentra en forma líquida en la Tierra, pero no ocurre así en Mercurio, de donde se ha evaporado toda hacia el espacio, o en Júpiter, donde está en forma de hielo. Y, en tercer lugar,

la Tierra era lo suficientemente grande como para retener una atmósfera que facilitara el ciclo fluido de elementos; pero no tanto como para que su gravedad retuviera una atmósfera demasiado densa, que no habría permitido el paso de la luz solar.

Cuando el Sol inició su incandescencia, una oleada explosiva de radiación se extendió por el naciente sistema solar agitando las atmósferas primitivas de la Tierra y los demás planetas intermedios. El hidrógeno, gas demasiado ligero para ser retenido por la gravedad de la Tierra, flotó hacia el espacio, o se combinó con otros elementos formando los ingredientes para la receta de la vida. Del hidrógeno que quedó una parte se combinó con carbono para formar metano (CH_4), otra con el oxígeno para formar agua (H_2O), otra con nitrógeno para formar amoníaco (NH_3) y una última con azufre para formar sulfuro de hidrógeno (H_2S).

Estos gases, reorganizados y recombinados en compuestos de largas cadenas, forman prácticamente todos los componentes de nuestros organismos. Aún se encuentran retenidos como gases en las atmósferas de los planetas mayores más alejados del Sol (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) o en forma sólida en sus superficies heladas. En el reciente, y aún en fusión, planeta Tierra, de menor tamaño, unos fenómenos más complejos que la gravedad empezaron a incorporar esos gases a procesos cíclicos que los han mantenido aquí hasta el presente.

La furia y el calor en que la Tierra se formó fueron tales que durante aquellos primeros años del eón Hadeense (entre 4500 y 3900 millones de años atrás) no existía suelo sólido, ni océanos, ni lagos, quizá ni tan sólo la nieve y ventiscas de los inviernos septentrionales. El planeta era una bola ardiente de lava líquida, que ardía por el calor desprendido de la desintegración del uranio, torio y potasio radiactivos de su núcleo. El agua de la Tierra, que salía vertiginosamente del interior del planeta en géiseres gaseosos, estaba tan caliente que nunca caía a la superficie en forma de lluvia; permanecía en

la parte alta de la atmósfera como vapor de agua incapaz de condensarse. La atmósfera era espesa, con gran cantidad de cianuro y formaldehído, ambos venenosos. No había oxígeno respirable, ni organismos capaces de respirarlo.

No hay rocas terrestres que hayan sobrevivido a este primitivo caos infernal. El eón Hadeense ha sido datado a partir de meteoritos y piedras que los astronautas del Apolo trajeron de la Luna, que carece de aire y empezó a enfriarse hace 4600 millones de años, cuando la Tierra estaba aún en estado de fusión. Hace unos 3900 millones de años la superficie de la Tierra ya debía de haberse enfriado lo suficiente como para formar una fina corteza sobre el manto aún fundido por debajo de ella. Esta corteza fue perforada desde el interior y recibió impactos en su parte externa. Los volcanes aparecieron por grietas y hendiduras, expulsando con violencia su lava fundida. Los meteoritos —algunos tan enormes como montañas y con mayor poder de explosión que las cabezas nucleares de las dos superpotencias actuales juntas— se estrellaban violentamente contra la caótica superficie del planeta, en la que formaban cráteres de los que se desprendían columnas de polvo ricas en materiales extraterrestres. Las oscuras nubes de polvo, arrastradas por violentos vientos, giraron vertiginosamente alrededor del globo durante meses antes de depositarse en la superficie. Mientras tanto, una enorme actividad de fricción era la causa de tormentas con gran aparato eléctrico que se extendían por todas partes.

Entonces, hace 3900 millones de años, empezó el eón Arqueense. Iba a durar más de mil trescientos millones de años e iba a ser testigo de todos los acontecimientos, desde el origen de la vida hasta su expansión en forma de suaves tapetes microbianos de vistosos colores rojos y verdes, y en forma de fuertes y redondeadas cúpulas bacterianas. Las inmensas cantidades de roca que 3000 millones de años más tarde llegarían a ser las masas continentales de América, Africa y Eurasia flotaban por el globo como antiguos continentes con formas que ahora serían irreconocibles para nosotros. Los continentes identificables aparecieron en su posición actual sólo en el último diez por ciento de nuestra historia planetaria.

El calor y la radiactividad, que aún bullían en el centro de la Tierra, enviaban lava incandescente a través de grietas en la corteza recién enfriada. Gran parte de esa lava contenía hierro magnético fundido cuyas moléculas se orientaron hacia el polo magnético terrestre a medida que se iba solidificando en forma de rocas. A principios de la década de los sesenta se hicieron estudios de estas antiguas orientaciones magnéticas y se tuvo confirmación de lo que ya se había observado anteriormente a partir de las formas de los continentes y de la correspondencia de los estratos rocosos y fósiles en sus bordes: las varias «plataformas» en que la corteza terrestre se halla dividida se deslizan sobre el manto fundido, separándose y chocando unas con otras en su desplazamiento. Moviéndose a una velocidad que va de centímetros a milímetros por año, una plataforma continental puede desplazarse cientos de kilómetros en un millón de años. Hace doscientos millones de años, por ejemplo, la India se encontraba unida a la Antártida, lejos del resto de Asia. A una velocidad de desplazamiento de unos cinco centímetros por año en dirección norte, tras haber recorrido más de 6000 km, se unió al continente asiático hace tan sólo unos sesenta millones de años.

Las zonas de unión de las plataformas son el punto de origen de una violenta actividad. En las zonas en que se separan y el magma rebosa para rellenar las grietas que van ensanchándose, se forma nueva tierra o fondo oceánico. Donde chocan abundan los terremotos y volcanes y la tierra se levanta formando las montañas. El lento pero violento enfrentamiento entre las plataformas india y asiática hicieron del Everest y de la cordillera del Himalaya el actual techo del mundo.

Los seísmos y temblores a lo largo de la falla de San Andrés, en California, marcan el inexorable avance de la enorme plataforma del Pacífico, que, moviéndose hacia el noroeste, choca contra la plataforma continental norteamericana, que se va desplazando a su vez hacia el norte. Y en el norte de Africa, el río Zambeze, en Mozambique, traza una línea de separación en la corteza terrestre —la Gran Fosa Africana— que divide en dos aquel continente. Hacia el sur, grandes cantidades de agua rellenan las grietas a medida que se van formando; grandes cantidades de rocas se derrumban. Hacia el norte, en Afar (Etiopía) el agua aún no ha ocultado la vista del continente, pero la roca fundida rezuma hacia la superficie y, al enfriarse, forma los basaltos almohadillados que serán el fondo de un nuevo océano panafricano. El fondo de este futuro océano aún estará seco durante mucho tiempo. Y la vista panorámica del valle de Afar es como lo que veríamos si se drenara el océano Atlántico y pudiéramos contemplar la formación del fondo oceánico a lo largo de una zona agrietada.

La falla de San Andrés, la fosa africana, la fosa del Atlántico medio, la dorsal del Pacífico oriental y el archipiélago volcánico de Hawai son zonas poco frecuentes de actividad geológica en un planeta muy tranquilo en la actualidad. Pero en el Arqueense, la actividad tectónica de ese tipo abundaba en la superficie de la Tierra. Enormes cantidades de vapor eran expulsadas al exterior por orificios causados por los choques de meteoritos y por las grietas que se formaban al separarse los distintos bloques. La Tierra permanecía cubierta por una oscura niebla de gases de carbono y de humos sulfurosos. El planeta era bombardeado por una lluvia de cometas helados y de meteoritos carbonados que, atravesando la atmósfera, caían sobre la superficie inestable y acababan por romper la corteza terrestre. Agua y carbono llegaron del espacio en cantidad suficiente para añadirse a las propias reservas terrestres de lo que más tarde sería la materia prima de la vida.

Al continuar enfriándose la superficie de la Tierra, las nubes de vapor que llenaban la atmósfera pudieron, por fin, condensarse. Lluvias torrenciales debieron de caer sin cesar durante un centenar de años y crearon océanos calientes y poco profundos. Los bordes sumergidos de las plataformas, ricos en productos químicos y energía, expulsaban a los mares, sin parar, gases ricos en hidrógeno. El agua que entraba en contacto con la lava incandescente en las grietas y volcanes se evaporaba y luego se condensaba y caía de nuevo en forma de lluvia. Las aguas empezaron a erosionar el paisaje rocoso, suavizando las cicatrices y heridas que las constantes erupciones

de los volcanes y el poderoso impacto de los meteoritos causaban en la superficie de la Tierra. También actuaban sobre las montañas, a medida que éstas se formaban, arrastrando minerales y sales hacia los océanos y lagos. Mientras, en lo que se ha llamado a veces el Big Belch (literalmente, «el Gran Eructo»), la actividad tectónica liberaba gases atrapados en el interior de la Tierra para formar una nueva atmósfera de vapor de agua, nitrógeno, argón, neón, y dióxido de carbono. Por aquel entonces, gran cantidad de amoníaco, metano y otros gases ricos en hidrógeno de la atmósfera primitiva se habían perdido en el espacio. Se producían tormentas eléctricas y el Sol seguía enviando calor y luz ultravioleta a la atmósfera de la Tierra, que iba haciéndose más gruesa, al tiempo que el planeta giraba a gran velocidad en ciclos de días y noches de cinco horas cada uno. La Luna se había condensado también en la nebulosa solar. Nuestro natural y fiel satélite, bastante grande para un insignificante planeta interior como la Tierra, actuó de manera rítmica, desde el principio, sobre las masas de agua, originando las mareas.

Y a este eón Arqueense, que va desde hace 3900 millones de años hasta hace 2500, pertenecen los primeros vestigios que se han hallado de vida.

2
La animación de la materia



Pocas búsquedas son tan mágicas como la de los orígenes de la vida. Los científicos, pendientes de cualquier indicio, han acumulado gran cantidad de datos. En 1973 fue descubierto un nuevo mundo submarino relacionado con nuestras ideas sobre los orígenes de la vida. El oceanógrafo Jack Corliss, un catedrático de la Universidad de Oregón, vio por primera vez las zonas de unión de la plataforma continental submarina donde magma, vapores y gases siguen mezclándose con el agua de mar como ocurría por doquier en los tiempos del eón Arqueense. De no ser por algún que otro pez de profundidad y por las persistentes películas que forman los microorganismos más resistentes, los negrísimos y fríos (4 °C) fondos oceánicos actuales serían completamente estériles. Sin embargo, a lo largo de los bordes de las plataformas continentales, por donde el azufre se escapa del manto ardiente que se extiende por debajo, se encuentran unas peculiares comunidades de organismos acuáticos. En zonas de este tipo —cerca de las islas Galápagos en el ecuador, en puntos alejados de la costa en Baja California (México) y a 3400 metros bajo el agua en el golfo de México, a pocas horas en dirección oeste de San Petersburg (Florida)—, los oceanógrafos han descubierto gigantescos gusanos tubícolas de color rojo del género *Riftia.* Se les ha dado este nombre porque el único lugar donde han sido hallados es en las grietas (*rift* en inglés) de

los fondos oceánicos. *Riftia,* igual que algunos peces, almejas gigantes, otros gusanos y algún cefalópodo observado esporádicamente, rodean grietas y hendiduras. Ninguno de estos animales abisales se alimenta de plantas. Los vegetales, las algas y cualquier forma de vida fotosintética necesitan luz; pero no hay luz que penetre hasta el fondo del mar. De lo que se alimentan estos animales que crecen en las fosas oceánicas es de bacterias filamentosas que utilizan como fuente de energía el azufre y otros gases ricos en hidrógeno que escapan del interior de la Tierra por manantiales submarinos de agua caliente.

La química de la cual se compone toda forma de vida, incluyendo nuestra propia carne, es la de los compuestos del carbono reducido; es decir, átomos de carbono rodeados de átomos de hidrógeno. Jack Corliss cree que la vida puede haberse iniciado en los bordes de la antigua plataforma, en las aguas poco profundas y cálidas del Arqueense. Allí los gases ricos en hidrógeno procedentes del interior de la tierra habrían reaccionado con los gases ricos en carbono de la atmósfera. De hecho, se cree que el 90 por ciento del carbono de nuestros cuerpos ha pasado alguna vez por esos bordes de la plataforma y por esos orificios.

La flexibilidad del carbono es uno de los secretos de la vida en la Tierra. En su estado excitado en las condiciones de calor, humedad y fusión del Arqueense, los átomos de carbono se combinaron rápidamente con hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre para generar una enorme variedad de substancias. Esta colección de moléculas que contienen carbono ha continuado, y continúa, existiendo, interaccionando entre sí, y evolucionando. Estos seis elementos son actualmente el común denominador químico de toda forma de vida y constituyen el 99 por ciento del peso seco de todo ser vivo.[15] Además, el tanto por ciento de cada uno de dichos elementos, la proporción de aminoácidos y componentes genéticos, así como la distribución de las proteínas largas y de las macromoléculas de DNA en las células, son semejantes en toda forma de vida, desde las bacterias hasta el cuerpo humano. De la misma manera que el reconocimiento que Darwin hacía de las semejanzas esenciales entre monos y seres humanos, estas semejanzas químicas indican la existencia de un antepasado común para toda forma de vida e indican, asimismo, las condiciones que debieron de darse en la Tierra primitiva cuando había poca diferencia, desde el punto de vista químico, entre las células vivas y el medio ambiente inmediato a ellas.

En 1953, una famosa serie de experimentos que se hicieron en la Universidad de Chicago marcaron el inicio de un nuevo campo de ciencia experimental que ha sido llamado indistintamente «química prebiótica», «modelos experimentales de la Tierra primitiva» o «evolución química experimental». Stanley L. Miller, un doctorando que trabajaba con Harold C. Urey, Premio Nobel de Química, bombardeó un modelo de atmósfera primitiva (mezcla de amoníaco, vapor de agua, hidrógeno y metano) con una descarga eléctrica semejante a la del rayo a lo largo de una semana. Obtuvo así dos aminoácidos (alanina y glicina), y otras muchas substancias orgánicas que hasta entonces se creía que sólo eran producidas por células vivas. (Los aminoácidos, pequeñas moléculas de hasta doce átomos de carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno, son los componentes de todas las proteínas.)

Desde los experimentos de Miller y Urey casi todos los componentes de las moléculas complejas de las células han sido obtenidos en laboratorio sometiendo diversas mezclas de gases sencillos y soluciones minerales a distintas fuentes de energía —arcos voltaicos, descargas eléctricas, radiaciones ultravioleta y calor—. Resulta satisfactorio que los cuatro aminoácidos más abundantes en las proteínas de todos los organismos sean los que se forman con más facilidad. El adenosín trifosfato (ATP), molécula indispensable que almacena energía en el interior de todas las células, y otros trifosfatos precursores de los nucléotidos (las bases estructurales de los genes) también pueden obtenerse en ese tipo de experimentos. En algunos de los estudios más recientes las cinco partes de los nucleótidos que componen el DNA y su molécula compañera, el RNA —adenina, citosina, guanina, timina y uracilo—, han podido ser detectadas en las mezclas resultantes del bombar-

deo con chispas eléctricas de metano, nitrógeno, hidrógeno y vapor de agua. El RNA (ácido ribonucleico) es, como el DNA, una larga molécula necesaria para el funcionamiento y reproducción de cada una de las células de todos los seres vivos. El RNA también transmite información y está compuesto por bases nitrogenadas, azúcares y ácido fosfórico, moléculas que podrían haberse formado todas por radiación solar en la Tierra en el eón Hadeense.

De igual manera que el medio ambiente de la Tierra primitiva, estas mezclas experimentales producen toda clase de sugestivos compuestos orgánicos. Su identidad y posible función son a menudo un misterio para los investigadores humanos, pero no lo son para los microbios de paso. Si no se mantienen en condiciones de esterilidad, en tanto permanecen en el agua, los compuestos químicos más complejos sintetizados en laboratorio son rápidamente engullidos por hongos y bacterias modernos transportados por el aire. Los microorganismos, que se encuentran por todas partes, no tienen más que posarse en el agua para tomar un bocado.

Aunque hasta ahora no ha salido ninguna célula de ningún tubo de ensayo, Leslie Orgel, un químico del Instituto Salk, ha descubierto una molécula semejante al DNA con 50 nucleótidos, que se formó espontáneamente a partir de compuestos de carbono sencillos y produjo sales en ausencia total de células vivas o de compuestos complejos. Manfred Eigen y sus compañeros del Instituto Max Planck de Göttingen han obtenido moléculas de RNA cortas que se han autorreplicado en ausencia total de células vivas. El ya fallecido Sol Spiegelman y su colega Donald Mills, de la Universidad de Columbia, sintetizaron en tubo de ensayo virus RNA infecciosos que eran capaces de replicarse continuamente en el interior de las células huésped. (Incapaces de crear todos los componentes necesarios para ser un verdadero sistema vivo, los virus son poca cosa más que un fragmento de DNA o RNA recubierto de proteína.) Aunque Spiegelman utilizó un solo enzima (substancia bioquímica reutilizable que acelera las reacciones químicas), un ácido nucleico (RNA en este caso) y los pequeños precursores moleculares de los ácidos

nucleicos llamados nucleótidos, contó con la ayuda de una forma de energía que no existía en la Tierra primitiva: esfuerzo humano y dólares.

Experimentos de este tipo han popularizado la creencia, tanto entre científicos como entre personas no expertas, de que una o pocas descargas eléctricas habrían sacudido la rica sopa de substancias químicas de los océanos del Arqueense, lo que habría causado la fusión de átomos de carbono e hidrógeno con otros elementos en las combinaciones adecuadas para producir vida. Una idea extendida es que la vida apareció súbitamente y casi instantáneamente a partir del caldo prebiótico. Otros científicos sostienen que la probabilidad de que se diera esa vida instantánea es muy remota; menos probable que la producción de un Boeing 707 al coincidir las piezas arrastradas por un huracán en un depósito de chatarra. Pero no hay una manera segura de valorar la generación espontánea de vida a partir de substancias inanimadas. Como dijo bromeando Leslie Orgel, experto en el estudio del origen de la vida, «ni tan sólo sabemos con un factor de 10^{20} si otros caldos son viables». Todo lo que sabemos es que la vida tuvo un principio. Algunos teóricos se ven forzados a afirmar que la Tierra debió de sembrarse con meteoritos que llevarían las moléculas de vida ya terminadas. Todos inciden en el hecho de que se han hallado cinco distintos tipos de nucleótidos y varios aminoácidos en meteoritos.

Sin embargo, las conclusiones de ambas teorías (la de «vida instantánea» y la de «vida a partir de meteoritos») se apartan del punto crucial: que la Tierra primitiva era el medio apropiado para la lenta elaboración de la vida primitiva a partir de la materia inerte. Había suficiente tiempo y energía disponibles para que las combinaciones moleculares propias de la vida surgieran de los enlaces químicos favorecidos por el medio ambiente rico en energía y que cambiaba de manera cíclica. Además, los compuestos químicos no se combinan al azar, sino de manera ordenada y según una pauta. No es necesario afirmar lo imprevisible cuando abundan las pruebas de lo previsible. La presencia de compuestos orgánicos en los meteoritos parece únicamente confirmar que un medio am-

biente rico en hidrógeno expuesto a la energía en presencia de carbono (condiciones que ciertamente se daban en todo nuestro sistema solar y quizás en todo el universo) producirá, de acuerdo con las reglas de la química, las piezas necesarias para la formación de la vida. Fueron las muchas otras características exclusivas de la Tierra, incluyendo su humedad, temperaturas suaves y propiedades gravitatorias, las que hicieron de ella un medio ambiente mejor que cualquier otro planeta para aquellas moléculas. Las condiciones de la Tierra favorecieron ciertas combinaciones químicas más que otras y, con el tiempo, se marcó una dirección.

Los estanques, lagos y mares superficiales y cálidos de la Tierra primitiva, expuestos como estaban a ciclos de calor y frío, de luz ultravioleta y oscuridad, de evaporación y lluvia, albergaban sus ingredientes químicos a lo largo de una sucesión de estados de energía. Se formaban combinaciones de moléculas que se rompían y volvían a formar de nuevo, siendo la entrada constante de energía procedente del sol la causa de aquellas uniones moleculares. A medida que los microambientes se estabilizaban, se formaban cadenas de moléculas cada vez más complejas y permanecían intactas por periodos de tiempo mayores. El cianuro de hidrógeno (HCN), por ejemplo, una molécula creada en el espacio interestelar y veneno mortal para la moderna vida que respira oxígeno, al unirse a sí mismo cinco veces se convierte en adenina ($H_5C_5N_5$), la parte más importante de los nucleótidos universales que componen el DNA, el RNA y el ATP.

Sin oxígeno en la atmósfera para reaccionar con él y para ser destruidos por él, los aminoácidos, los nucleótidos y los azúcares sencillos pudieron formarse y permanecer juntos en disolución. Incluso el ATP, una molécula utilizada por todos los seres vivos como transportador de energía, pudo formarse de la unión de adenina con ribosa (un azúcar con cinco átomos de carbono) y tres grupos fosfato.

Algunas moléculas acabaron siendo catalizadores; favorecían y aceleraban la unión o la separación de otras moléculas

sin ser ellas destruidas. Los catalizadores fueron importantes antes de la aparición de la vida porque actuaban contra el azar para producir un orden y una pauta en los procesos químicos. Poco a poco, esos catalizadores y las reacciones que facilitaban proliferaron más que otras combinaciones. Aunque eran cada vez más complejos, aquellos procesos tenían durabilidad y permanecían en las aguas de la Tierra primitiva. Hoy en día, determinados grupos de moléculas pueden actuar de autocatalizadores en una serie de reacciones sorprendentemente complejas y ordenadas o en reacciones cíclicas, en la que cada cambio es el origen de otro en la cadena molecular. Algunas de estas reacciones autocatalíticas «sin vida» forman patrones cuya complejidad, al ir aumentando con el tiempo, tiene reminiscencias vitales.

A partir de cálculos teóricos y de pruebas de laboratorio, se ha pensado que una interacción entre dos o más ciclos autocatalíticos podrían haber producido un «hiperciclo». Algunos científicos mantienen la teoría de que dichos compuestos catalizadores «competían» por elementos en el medio ambiente y, por tanto, limitaban automáticamente su existencia. Pero la idea básica del hiperciclo es precisamente lo contrario. Lejos de destruirse unos a otros en una lucha por la supervivencia química, los compuestos, en un proceso de autoorganización, se complementaban para producir estructuras que acababan replicándose, como si tuvieran vida. Estos procesos cíclicos formaron la base no sólo de las primeras células, sino de la enorme cantidad de estructuras basadas en células y sus productos que siguieron. Los procesos cíclicos son muy importantes en los seres vivos. Permiten que la vida conserve los elementos clave de su pasado, a pesar de las fluctuaciones y la tendencia hacia el desorden del medio ambiente exterior.

Cuanto más protegidas y concentradas estaban las sustancias químicas, más podía aumentar su actividad y más complejas y autorreforzantes podían llegar a ser. Algunas pueden haberse protegido en el interior de burbujas o haberse mantenido en las superficies regulares de arcillas y cristales. Los experimentos de la naturaleza en el Arqueense con cadenas de hidrocarburos largos producían compuestos que podían encap-

sular una gotita del agua circundante y su contenido permitiendo, sin embargo, la entrada y salida de otras substancias químicas. Se trataba de la membrana semipermeable, una especie de puerta entreabierta que permitía la entrada de determinadas substancias químicas, impidiendo, sin embargo, el paso de otras. Los compuestos químicos se unieron para formar membranas y, empeñados en la tarea de construir la vida, lograron unas estructuras que son una maravilla de simplicidad. Los acontecimientos que llevaron a su formación se han repetido en el laboratorio en las condiciones de temperatura, acidez y ciclos de humedad y evaporación que son normales en la Tierra.

Una cadena de hidrocarburo unida a un grupo de átomos de fósforo y oxígeno muestra una carga eléctrica en el extremo en que se halla el fosfato, mientras que no posee carga alguna en el otro extremo. El compuesto químico, como un todo, atrae el agua por su extremo cargado y la repele por el extremo sin carga. Estas substancias, llamadas fosfolípidos, tienden a alinearse unas junto a otras, con el extremo desprovisto de carga eléctrica alejándose del agua, mientras que el extremo cargado apunta hacia ella. (Esto es lo que ocurre esencialmente cuando una gota de aceite cae en el agua, formando al momento una película.) Estos y otros tipos de lípidos tienden a formar gotas espontáneamente, aislando las substancias de su interior de las del exterior. Se ha comprobado que, además, forman una doble capa cuando dos superficies de agua en las que hay una película superficial de lípidos entran en contacto por un movimiento ondulante. Cuando esto ocurre, los extremos cargados de la capa de lípidos quedan encarados, envueltos por los extremos no cargados. De esta manera se formaron las primeras membranas, las primeras barreras semipermeables que distinguían «dentro» y «fuera», la primera distinción entre propio y distinto.

Las membranas de los organismos actuales se componen de varios tipos de lípidos, proteínas e hidratos de carbono, con funciones tan complejas y calibradas con una precisión que todavía estamos lejos de comprender. Pero la primera membrana de fosfolípido, a diferencia de otras estructuras envolventes

que pueden formarse también en crisoles de la naturaleza, podía, gracias únicamente a sus propiedades químicas, concentrar una solución de otros compuestos de carbono. Podía mantener en estrecha proximidad componentes con capacidad potencial de interacción y permitía la entrada a los «nutrientes», mientras que evitaba la salida de agua. La membrana hace posible la existencia de la unidad discreta del microcosmos, la célula bacteriana. La mayor parte de científicos cree que los lípidos se combinaron con proteínas para formar paquetes translúcidos de substancias semejantes a la materia viva antes de la aparición de la vida misma. No se conoce ningún tipo de vida sin la existencia de algún tipo de membrana.

Aún hay un eslabón perdido entre las más complejas invenciones de los científicos y la más sencilla célula viable, tanto en teoría como en la práctica de laboratorio. La distancia entre las substancias químicas de pequeño tamaño molecular, como aminoácidos y nucleótidos, y las de mayor tamaño y origen biológico, como el RNA y las proteínas, es enorme. Pero unos cientos de millones de años de actividad molecular suponen una extensión de tiempo muy larga. Los científicos sólo han trabajado durante unas décadas para lograr en el laboratorio las condiciones que conducen a la vida pero han llegado muy lejos. Es posible que antes de que acabe el siglo XX una célula viva sea generada espontáneamente en el tubo de ensayo. Si se consideran millones de años, las probabilidades de formación espontánea de hiperciclos fueron inmensamente mayores que las que tienen los investigadores, los cuales han de substituir la ciega perseverancia del tiempo por la planificación, si quieren llegar a recrear la vida.

Es probable que no sólo una vez, sino varias, los aminoácidos, nucleótidos, azúcares sencillos, y los fosfatos y sus derivados se hayan formado y se hayan hecho más complejos con la energía del sol y protegidos en el interior de una burbuja de lípidos, absorbiendo del exterior ATP y otros compuestos de nitrógeno y carbono como «alimento». En el laboratorio, a partir de mezclas de lípidos se han formado espontáneamente estructuras bastante complejas. Por ejemplo,

David Deamer, en la Universidad de California en Davis, observó que unas esferas de lípidos captaban y rodeaban algunos nucleótidos, si se mezclaban los ingredientes apropiados en las condiciones adecuadas. Las burbujas de lípidos se dividían en dos al principio tan sólo por la fuerza de la tensión superficial, manteniendo cada mitad su propia actividad interna. Posteriormente, las moléculas catalizadoras del interior podrían haber empezado a mantener activamente las membranas de lípidos. Es posible que al agotarse el suministro de elementos componentes disponibles en su reducido nicho ecológico, las protocélulas simplemente se desintegraran y desaparecieran, mientras otras se formaban en otros charcos en zonas intermareales, cada una con un *modus operandi* ligeramente distinto.

Para considerar que una entidad está viva, ésta ha de ser ante todo *autopoyética,* es decir, ha de mantenerse activamente contra las adversidades del mundo.[16] La vida responde a las perturbaciones utilizando materia y energía para permanecer intacta. Un organismo intercambia constantemente sus piezas, substituyendo sus componentes químicos, sin perder nunca su identidad. Este fenómeno holístico modulador que es la autopoyesis, el automantenimiento activo, se encuentra en la base de toda vida conocida; todas las células reaccionan a las perturbaciones externas para conservar aspectos clave de su identidad dentro de sus límites. Si las amenazas externas son muy importantes, se pueden interrumpir los procesos cíclicos normales y llegar a la esquismogénesis. *Esquismogénesis,* una palabra acuñada por el biólogo y filósofo Gregory Bateson, con la que aludimos a ciclos en los sistemas vivos que oscilan incontrolablemente. Baterson creía que la esquizofrenia podía originarse por un tipo especial de esquismogénesis, en ese caso una superabundancia de sistemas de retroalimentación en el cerebro que conducía a desintegración mental. Pero ése es sólo un ejemplo muy específico de fallo en los procesos cíclicos normales. En organismos como plantas y animales generalmente reconocemos la autopoyesis como «salud». Esquismogénesis es lo contrario. Pero incluso los predecesores de las células debieron de tener algún tipo de autopoyesis, la capacidad de mantener su integridad estructural y bioquímica al enfrentarse a las amenazas ambientales.

Tras conseguir la capacidad de automantenimiento, una estructura en vías de hacerse «viva» debe reproducirse a sí misma. Antes de la célula, quizá no se podía distinguir entre vida y no vida. Los primeros sistemas de tipo celular fueron lo que Ilya Prigonine, físico belga ganador del Premio Nobel, ha definido con el término «estructuras disipativas»: objetos o procesos que se organizan a sí mismos y que cambian de forma espontáneamente. Con un aporte de energía, las estructuras disipativas pueden hacerse más ordenadas. El tipo de teoría de la información que ha sido tan útil en la tecnología de comunicación sólo se aplica a la información que consiste casi completamente en confirmación. En las estructuras disipativas la información empieza a autoorganizarse; se forman bolsas de elaboración.

A partir de las estructuras disipativas y los hiperciclos surgió la cadena de nucleótidos, ribosa y fosfato que puede autorreplicarse y catalizar las reacciones químicas. Esta cadena es el ácido ribonucleico, o RNA, la primera fase en el lenguaje de la naturaleza. Sin ser todavía autopoyético, pero ya muy estructurado, el RNA primitivo en esferas rodeadas de filamentos lipídicos se acumuló en las aguas cálidas y ricas en materia orgánica de una Tierra benigna. Sin depredadores y con gran cantidad de energía, se fue haciendo más complejo. En la Tierra del eón Hadeense, antes de la aparición de la vida se dieron dos tendencias químicas: la autorreferencia y la autocatálisis. Las substancias químicas reaccionaron de manera cíclica, produciendo versiones y variaciones de sí mismas que tendían a crear un medio ambiente favorable a la repetición de las reacciones originales. Las estructuras autopoyéticas llevaron la organización un poco más lejos: utilizaron energía para mantenerse a sí mismas de manera activa y con éxito al enfrentarse con serias perturbaciones externas. Sus límites quedaron bien definidos. Eso les dio identidad y memoria. Actualmente, aunque todas las substancias químicas de nuestro cuerpo son sustituidas continuamente, no cambiamos de nombre ni creemos ser distintos por ese motivo. Nuestra organiza-

ción está protegida o, mejor dicho, se protege a sí misma. Desde las estructuras disipativas a los hiperciclos del RNA, desde los sistemas autopoyéticos a los primeros seres replicándose de manera tosca, se dibuja la tortuosa senda que las estructuras autoorganizadas tuvieron que recorrer en su trayecto hacia la célula viva.

3
El lenguaje de la naturaleza



Según el *Génesis,* Dios detuvo la construcción de una alta y majestuosa torre en Senaar al introducir distintas lenguas. La Torre de Babel nunca alcanzó el cielo porque sus constructores, despojados de su lengua común, acabaron confundidos. Esta parábola muestra la importancia de un lenguaje universal. Mientras la humanidad continúa hablando muchas lenguas (menos, a medida que pasa el tiempo), el código genético, que permite la traducción de los genes en proteínas, es en todas partes el mismo.

El estudio del actualmente universal lenguaje genético basado en el RNA y DNA que emergió de la Babel de los compuestos químicos del Arqueense ha hecho que sea realmente apasionante la nueva ciencia de la biología molecular. El código genético es un fenómeno único. La molécula de DNA o RNA puede replicarse exactamente a sí misma; pero también puede causar el montaje uniforme de esas otras substancias químicas propias de los organismos vivos, las proteínas. Esa fue la idea básica de la revolución de la biología molecular, que se inició cuando James Watson y Francis Crick descubrieron la estructura del DNA en 1953.

A pesar de lo milagroso que parece, el fenómeno de la replicación es, en una base molécula a molécula, un proceso químico que sorprende por su sencillez. Una estructura química complementaria determina la forma y propiedades de las

moléculas que se duplican: el DNA y el RNA son una mitad longitudinal de una larga y única molécula. Como los dientes de una cremallera, en presencia de los ingredientes adecuados, los componentes de cada mitad simplemente se disponen alineados y encajan unos con otros.

El RNA es una especie de media molécula particularmente adaptable. Puede emparejarse con otra molécula de RNA tan larga como ella o enlazar cortos fragmentos de nucleótidos unidos a aminoácidos para producir todas las proteínas que dan a los organismos sus formas y configuraciones variadas. Los componentes del RNA son los cuatro nucleótidos distintos, las bases adenina, guanina, citosina y uracilo, cada una de las cuales lleva un grupo fosfato (compuesto de fósforo y oxígeno) y ribosa, un tipo de azúcar. Tomada en grupos de tres, la secuencia de nucleótidos en un tipo de RNA puede ser una señal para que un segundo tipo de RNA complementario se una a aminoácidos de su medio ambiente. A medida que los aminoácidos se van uniendo, uno tras otro, se forma una proteína que puede, a su vez, acelerar el trabajo de elaboración de la molécula de RNA, produciendo, por lo tanto, más RNA.

Los primeros cuerpos autopoyéticos encerrados en una membrana probablemente se regían sólo por RNA. Podrían autorreplicarse produciendo proteínas, que elaboraban más RNA. El desarrollo de la molécula de DNA, de doble hélice, más larga y menos propensa a accidentes, debió de ser posterior y tomó, poco a poco, la función de molde o plantilla para la copia de RNA.

El DNA también está formado por sólo cuatro nucleótidos, cada uno con un azúcar, y un grupo fosfato. El DNA tiene timina en vez del uracilo del RNA y su azúcar es la desoxirribosa en vez de la ribosa. Los dos fragmentos longitudinales de DNA y RNA entrelazados se acoplan con la adenina siempre unida a la timina y con la guanina, que lo está a la citosina, debido también en este caso a su estructura química. La bacteria más pequeña posee centenares de miles de esos componentes apareados, los llamados pares de bases; las células animales y vegetales, muchos millones. Actualmente todas las células poseen DNA y RNA. La secuencia de nucléotidos conduce a la secuencia de proteínas, que produce más nucleótidos, disponiéndolos también secuencialmente. Esta disposición secuencial de substancias químicas no es sólo disipativa y autopoyética, es el antepasado reproductor de toda forma de vida en la Tierra.

Las proteínas hacen que un organismo sea como es. La secuencia de nucleótidos especifica la composición y cantidad de proteínas. Si los organismos difieren unos de otros es principalmente porque las secuencias de nucleótidos en sus moléculas espirales de DNA también difieren. Las variaciones en el orden y en el número de los pares de nucleótidos conducen a la fabricación de proteínas diferentes. Un mínimo de varios miles de proteínas distintas en cada célula determinan el aspecto del organismo, cómo se mueve, cómo funciona su metabolismo. Todas las células necesitan proteínas para activar las reacciones químicas. Sin determinadas proteínas, muchas reacciones biológicas esenciales se realizarían muy despacio o se pararían de repente. Imperarían el caos y la química ordinaria.

El denominador común de la vida va aún más lejos. Solamente unos veinte aminoácidos diferentes, unidos en cadenas que comprenden desde unas pocas docenas hasta unos centenares, forman las proteínas en todos los seres vivos conocidos de la Tierra. La secuencia de aminoácidos determina en primer lugar la forma de la proteína, y esa forma determina su función. El código para la traducción de la secuencia de nucleótidos del DNA en una secuencia de aminoácidos de la proteína es casi universal. Una determinada secuencia de nucleótidos se traducirá casi siempre en una misma secuencia de aminoácidos.

En todos los organismos, cada triplete de nucleótidos en el ácido nucleico codificador, llamado codón, especifica un aminoácido. Pero hay indicios de que codones con dos nucleótidos pueden haber constituido una versión temprana de ese sistema. Por ejemplo, el tercer nucleótido en un codón es a menudo redundante: uracilo, adenina, citosina o guanina podría, cada uno de ellos, ser el tercer nucleótido después de un doblete citosina-guanina para formar un triplete en el RNA mensajero. En cada uno de los cuatro casos se codificaría la

arginina. Además, el nucleótido del centro a menudo determina los aminoácidos más sencillos y corrientes. El código genético primitivo era, sin duda, más sencillo y menos fiel de lo que es en la actualidad. Es un lenguaje vivo, que aún evidencia sus raíces etimológicas.

Como las palabras, los elementos del código genético pueden ser interpolados, ordenados de distinta manera, cambiados y transmitidos de forma alterada. Las mutaciones son cambios hereditarios en la cantidad o en la secuencia de las bases del DNA. Se produce una mutación cuando algo en el medio ambiente, por ejemplo una radiación, rompe un enlace químico o produce uno que no era necesario ni deseable. El cambio resultante en la secuencia de DNA, que confiere nuevas ventajas o desventajas, o bien se copia y pasa a los descendientes de la célula o bien causa su muerte. Como la diferencia de una letra entre las palabras «riña» y «risa», pequeños cambios o añadidos pueden tener un efecto sinérgico.

Con el entusiasmo que siguió al descubrimiento del importante papel del DNA y del RNA, la responsabilidad por la diversidad de la vida se atribuyó exageradamente a mutaciones sin importancia de pares de bases en aquellas moléculas. Pero se calcula que la proporción de mutación es de un par de bases por cada grupo de uno a mil millones de células por generación, lo que parece insuficiente para explicar la gran variedad de seres vivos.

En el lenguaje, los cambios más rápidos y significativos se producen a través del habla. El argot callejero y la jerga, productos del lenguaje oral en su nivel más básico y corriente, se filtran constantemente en la corriente principal del lenguaje y acaban encontrando un lugar en los diccionarios oficiales. Como descubriremos en el próximo capítulo, el microcosmos es el lugar en que el mensaje genético experimenta continuos y rápidos cambios.

La lectura y la copia del mensaje genético pueden realizarse en un corto espacio de tiempo. De segundos a minutos, las proteínas se forman a partir de los aminoácidos. Aunque el DNA aislado no puede replicarse, si se coloca en un tubo de ensayo con proteínas (catalizadores), nucleótidos (alimento) y

un suministro de energía (precisamente la energía química de los nucleótidos), el DNA puede hacer una copia de sí mismo en segundos. En lo que puede ser un posible gran beneficio para la medicina del futuro, puede hacerlo incluso después de haber estado congelado en solución y mantenido en frascos de cristal durante varios años. Aunque no es capaz, como los organismos completos, de mantenerse a sí mismo, el ADN puede autorreplicarse en el medio químico apropiado.

En 1977, Sir Frederick Sanger y sus compañeros de equipo en un laboratorio de investigación médica en Cambridge, Inglaterra, descifraron el primer mensaje genético completo y descubrieron un nuevo rasgo de aquel lenguaje. El DNA de un virus llamado $\phi\chi$174 tiene una longitud de tan sólo unos 5375 nucleótidos, lo que representaría aproximadamente unos 1792 aminoácidos, que servirían para unas cinco proteínas. Sin embargo, lleva el mensaje para nueve distintos tipos de proteína, para lo que se necesitan unos 3200 aminoácidos. El grupo de Sanger descubrió que, usando el mismo DNA, un fragmento de ácido nucleico determina más de una proteína según donde empiece la lectura del mensaje. Eso, en principio, parece una sorprendente «invención» molecular. Sin embargo, si se tiene en cuenta una vez más que la vida se mantiene a sí misma a toda costa, utilizando mensajes de nucleótidos para especificar proteínas, no parece tan inverosímil que el código genético haya desarrollado frases con doble sentido. Lo cierto es que una única secuencia de nucleótidos es leída con diferentes significados en varios tipos de células, así como en algunas mitocondrias. La ambigüedad es algo corriente en el lenguaje universal de la vida.

En el estudio de animales complejos y de vegetales, caracteres tales como pulmones, ojos o flores, que requieren la interacción de muchos factores genéticos, son llamados *semes*. Además, la vida en los primeros tiempos evolucionó gracias a las condiciones que favorecían no caracteres individualizados (este enzima o aquel par de base de nucleótidos), sino semes, cadenas de reacciones entre substancias químicas que produ-

cían alimento o movimiento o alguna otra aptitud importante. En los microorganismos, los semes solían ser metabólicos. Por ejemplo, aquellos que producían ellos mismos los metabolitos que necesitaban utilizando el dióxido de carbono del aire, morían de inanición con menor frecuencia que aquellos que no eran capaces de alimentarse a partir del carbono de la atmósfera. Los pasos bioquímicos que permiten la utilización del dióxido de carbono atmosférico son un ejemplo de seme microbiano.

Carece de sentido querer fijar un determinado momento en que se produjo la chispa mágica para el inicio de la vida con la formación espontánea del DNA y el RNA. Antes de que la elegante doble hélice de nuestro más remoto antepasado se formara y replicara con gran fidelidad, muchas estructuras disipativas, largas cadenas de reacciones químicas distintas, debieron de evolucionar, reaccionar y romperse. Seguramente surgieron y se desarrollaron durante un tiempo formas vivas basadas en tipos totalmente distintos de moléculas replicantes para desaparecer luego totalmente. Pero al ser actualmente el denominador común de todo tipo de vida, está claro que en algún momento empezaron a proliferar membranas lipídicas que encerraban en su interior RNA y DNA. El número de aquellas diminutas esferas bacterianas aumentaba y disminuía en un proceso de flujo y reflujo. Copiando el símil de Julian Huxley, las olas rompen y retroceden por sí mismas; sin embargo, la marea no deja de subir. En algún momento, hace ya más de 3500 millones de años, la marea evolutiva alcanzó el nivel de la vida tal como ahora la conocemos, la de la célula limitada por una membrana, con 5000 proteínas, utilizando el RNA como mensajero y gobernada por el DNA. Cuando la autopoyesis aseguró su existencia y la reproducción garantizó su expansión, la evolución inició su camino. Había empezado el microcosmos de la Tierra, la Edad de las Bacterias.

Los diminutos sacos de DNA y RNA del Arqueense realizaron sus actividades de manera prodigiosa. Sin saber lo que era el descanso, crecían, consumían energía y substancias químicas orgánicas y se dividían sin cesar. Sus colonias y fibras se interconectaban y cubrían el globo estéril con una película discontinua. Las dimensiones de esta película han ido creciendo hasta formar una pátina de vida, o biosfera, que es el lugar en que existe la vida. En la actualidad la biosfera que rodea la Tierra ocupa un espesor que va desde una profundidad algo mayor a los 8000 mil metros en el océano hasta una altura cercana a los 9000 metros, por encima de las cumbres de las montañas, en lo más alto de la capa inferior de la atmósfera, llamada troposfera. Las bacterias se expandieron primero en el agua, donde modificaron el líquido y produjeron gases. Después se extendieron hacia la superficie de los sedimentos, donde aún sobreviven. Ninguna pasó toda su vida en la atmósfera, y ningún ser vivo lo hace actualmente. Sin embargo, algunos organismos pueden pasar algún tiempo en ese medio, principalmente en forma de partículas en estado latente, como semillas, esporas y huevos. La biota (el conjunto de seres vivos de la Tierra) se hace menos densa en sus extremos, a varios miles de metros por la parte superior y por la inferior. El núcleo de vida en la Tierra, el lugar en que la biota es más próspera, ha ocupado, y sigue ocupando, unos pocos metros de espesor en la superficie de la Tierra. El doctor Sherwood Chang, del Centro de Investigación Ames de la NASA, ha sugerido que la vida probablemente empezó en la interfase de las superficies líquidas, sólidas y gaseosas, donde se da un flujo de energía que permite a las estructuras disipativas formarse con facilidad. La vida actualmente sigue siendo próspera en las zonas en que el agua entra en contacto con la tierra y el aire. La biota, la suma de toda vida, principalmente como microbiota, el total de toda vida microbiana, es antigua, y se extiende por toda la biosfera. Con el tiempo se ha ido esparciendo. Sin embargo, desde el punto de vista de la innovación química y metabólica no ha cambiado de manera significativa. Compuesta por todos los seres con capacidad reproductora, y continua a través del tiempo, la pátina planetaria tiene vida propia. La biota cicla substancias inorgánicas, como rocas, barros y gases, modulándose y controlándose a sí misma. Las células en colectividad conservan las

condiciones del agua, del carbón y del hidrógeno como en su origen. La biosfera retiene en su interior gases como el hidrógeno y el metano que, de otra manera, hace tiempo que habrían desaparecido de la Tierra por procesos químicos. Mantiene así un recuerdo de sí misma.

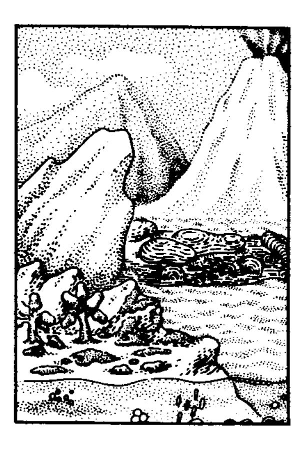
En cierto sentido, la esencia de la vida es una especie de memoria. Representa la conservación física del pasado en el presente. Al reproducirse, las formas de vida fijan el pasado y graban mensajes para el futuro. Las bacterias del presente que evitan el oxígeno nos están hablando del mundo sin oxígeno en que hicieron su aparición. Los peces fósiles nos hablan de extensas masas de agua que han existido continuamente desde hace cien millones de años. Las semillas que necesitan temperaturas por debajo de cero grados para germinar nos hablan de inviernos gélidos. Nuestro propio embrión humano va repitiendo fases de la historia animal a lo largo de su desarrollo.

Dicho de otra manera, la vida es extremadamente conservadora. Consume energía a cualquier nivel (el organismo individual, la especie, la biota como una unidad) en un esfuerzo por conservar su pasado, aunque algunas amenazas la fuerzan a innovaciones. Dado que la autopoyesis es un imperativo de la biota considerada como una unidad, la vida gastará grandes cantidades de energía para conservarse a sí misma. Cambiará con la única finalidad de mantenerse.

Apenas se duda de que la pátina del planeta, incluyéndonos a nosotros, sea autopoyética. La vida en la superficie de la Tierra parece regularse a sí misma cuando se enfrenta a perturbaciones externas, y lo hace sin tener en cuenta los individuos y las especies que la componen. Más del 99,99 por ciento de las especies que han existido están extinguidas, pero la pátina del planeta, con su ejército de células, ha continuado existiendo durante más de tres mil millones de años. Y la base, pasada, presente y futura, de esa pátina es el microcosmos, constituido por billones de microbios en comunicación y en continua evolución. El mundo visible es una porción reciente y sobredesarrollada del microcosmos; funciona únicamente gracias a su bien desarrollada conexión con las actividades del microcosmos. Se cree que los microbios han mantenido por sí mismos la temperatura media de la Tierra, haciéndola acogedora para la vida, a pesar de que el Sol al principio era mucho menos luminoso, según creen los astrónomos. En los tiempos del Arqueense los «estúpidos» microbios también modificaron continuamente la composición química de la atmósfera para que no se hiciera prohibitiva para la vida como un todo. Así, a partir del registro fósil continuo sabemos que la temperatura y la atmósfera del planeta nunca han destruido completamente la vida. Excluyendo la intervención divina y la suerte, sólo la vida misma parece lo suficientemente poderosa como para promover las condiciones que favorecen su supervivencia prolongada frente a condiciones adversas en el medio ambiente.

Intentando comprender de la mejor manera posible los formidables poderes de la biosfera en que se desarrolla nuestra vida, es difícil mantener la ilusión de que la naturaleza está indefensa sin nuestra ayuda. Pese a lo importantes que pueden parecernos nuestras actividades, el papel del hombre en la evolución es pasajero y podría prescindirse de él en el contexto de la rica capa de seres vivos que conviven en la superficie del planeta. Podemos contaminar el aire y el agua a nuestros nietos y acelerar nuestra propia desaparición, pero eso no tendrá ningún efecto en la continuación del microcosmos. Nuestros propios cuerpos se componen de mil billones de células animales y de *cien* mil billones (100 000 000 000 000 000) de células bacterianas. No servimos de alimento a ningún «enemigo» natural. Pero después de la muerte volvemos a nuestro olvidado y pisoteado suelo. Las formas de vida que reciclan las substancias de nuestro cuerpo son en primer lugar bacterias. El microcosmos sigue evolucionando a nuestro alrededor y en nuestro interior. Se podría decir, como veremos más adelante, que el microcosmos está evolucionando *al igual que* nosotros.

4
Adentrándonos en el microcosmos



En 1977, en las afueras de una pequeña ciudad sudafricana de montaña llamada Fig Tree, el profesor Elso S. Barghoorn, catedrático de paleontología de la Universidad de Harvard, cortó y recogió muestras de una roca parecida al pedernal en la ladera de una erosionada montaña de Barberton Mountain Land. De regreso a Cambridge (Massachusetts), preparó cortes translúcidos de aquella muestra y los colocó bajo el microscopio.

El agua, que contenía minerales de los volcanes cercanos, había formado el pedernal negro, que Barghoorn sabía por experiencia que es el tipo de roca con mayor probabilidad de contener fósiles. Hace más de 3000 millones de años, en este mismo lugar se produjo un aporte continuo de lava rica en sílice que endureció el barro negro que había allí, convirtiéndolo en pedernal. Los volcanes turbulentos proyectaban cenizas y esas cenizas caían a grandes montones sobre el barro y en el agua del actualmente desaparecido mar de Swazilandia, que durante millones de años cubrió la mayor parte de lo que es hoy en día el sur de Africa. Los años de vulcanismo y de erosión, de transporte de cascotes y piedras, formaron un sedimento de numerosos y complejos estratos de rocas. Durante prolongados periodos de tiempo, esos estratos cubrieron las costas y revistieron el fondo del antiguo mar. En la actualidad, colinas y plataformas rocosas que se extienden por centenares de kilómetros en Sudáfrica y el país de Swazilandia, dan constancia de aquel desaparecido paisaje. En algunos lugares los complejos estratos de roca de Swazilandia tienen un espesor de más de quince kilómetros.

La zona de Swartkoppie, en este océano fósil, se ve adornada por vetas de depósitos carbonosos, con un espesor de varios centenares de metros, que podrían ser confundidos con los restos de un pantano tropical de árboles, helechos y licopodios, como los que produjeron carbón en Pennsilvania hace 300 millones de años. En la Tierra, esos depósitos ricos en carbono siempre han significado vida fotosintética. Pero esas rocas de Swazilandia se sedimentaron hace 3400 millones de años; son más de diez veces más antiguas que los bosques pantanosos (los fósiles más antiguos de plantas terrestres tienen una antigüedad de 400 millones de años).

El profesor Barghoorn había estado investigando la antigüedad de la vida. Tras profundos estudios, en colaboración con sus discípulos, de los cortes finos de pedernales africanos, descubrió en ellos cientos de objetos redondos, en su mayoría simples esferas. Pero uno o dos, que tenían forma de halteras, llamaron su atención y le hicieron pensar si no se trataría de formas vivas en el momento de su división. En otras muestras procedentes de la cercana formación rocosa de Kronberg, se encontraron filamentos microscópicos semejantes a las actuales cianobacterias (algas azules). Eran los fósiles más antiguos encontrados en el planeta, prueba evidente de que las bacterias, por entonces ya unos organismos expertos en la fotosíntesis, crecían muy bien en la Tierra tan sólo quinientos millones de años después de que se formaran las primeras rocas.[17]

El hallazgo de Barghoorn en Sudáfrica fue el fruto de una búsqueda hecha a conciencia. Hacía más de veinte años, en la Universidad de Wisconsin, el geólogo Stanley Tyler le había mostrado rocas procedentes de la orilla norte del lago Superior. Aquellas rocas, con una antigüedad de más de dos mil millones de años, estaban impregnadas de objetos extraños que a Barghoorn le parecieron fósiles de organismos microscópicos. Es decir, que desde 1954 Barghoorn había estado bus-

cando vida primigenia. Su obstinado empeño en hallar los fósiles más antiguos en rocas de aspecto común le llevaron a una frenética búsqueda de microfósiles que prosigue en la actualidad.

Hasta mediados de este siglo se creía que la vida había empezado hacía algo más de 570 millones de años, ya que en las rocas de esa edad de todas partes de la Tierra se habían encontrado fósiles de animales con cubierta dura en abundancia extraordinaria, tanta que, a menudo, se habla de este fenómeno como de la explosión cámbrica. Hasta entonces nunca se habían encontrado fósiles de animales con esqueleto en rocas más antiguas. Algunos científicos, sin tener en cuenta que animales más sencillos y de cuerpos más blandos podían no haberse conservado, dedujeron que no sólo los animales habían aparecido de manera repentina, sino también la vida misma.

Resultó que las rocas de Inglaterra y Gales, que albergan algunos de los depósitos de fósiles de organismos primigenios mejor estudiados, carecían de los últimos estratos precámbricos. Cuando se hallaron formaciones de rocas más continuas en China, el sur de Australia, Siberia y en muchas otras zonas, se observaron en ellas abundantes impresiones en arenisca de animales marinos de cuerpo blando, fáciles de identificar, que se conservaban en excelentes condiciones. Más recientemente, el Precámbrico ha sido minuciosamente revisado por Barghoorn y otros científicos para descubrir sus fósiles, que eran difíciles de percibir, lo que ha proporcionado una buena prueba de que el probable origen de la vida es más antiguo de lo que se había creído.

No todas las pruebas de vida primigenia se obtienen únicamente a partir de los fósiles de los propios organismos. Las rocas sedimentarias más antiguas de la Tierra se encuentran en lo que se conoce como la Formación Isua, al este del Labrador y al sudoeste de Groenlandia, en el límite del Casquete Polar Artico. Estas rocas pueden ser los cementerios de ricas películas y espumas bacterianas del Arqueense. Con una antigüedad de casi 4000 millones de años, 3800 para ser más exactos, se vieron sometidas a temperaturas y presiones tan

enormes que era imposible que fósil alguno se conservara intacto. Pero pueden haber quedado huellas de vida en Isua. El carbono, elemento clave para la vida, es abundante en algunas rocas de Isua y sus isótopos radiactivos (C^{13} a C^{12}) han sido hallados en proporciones típicas de organismos fotosintéticos.[18] Ese aumento de carbono 12, esa desviación en la proporción de las dos formas distintas de este elemento, ¿debió de ser consecuencia de fotosíntesis bacteriana? ¿Hay que considerar ese depósito rico en carbono como los restos de la pared celular, de los genes y proteínas de las bacterias? El carbono de las rocas de Isua se encuentra en forma de grafito, que se forma cuando el esquisto (un tipo de barro que se hace duro como la piedra) se somete a presión y calor intensos. Si ese grafito se formó a partir de los restos de bacterias que vivieron en el barro, entonces podría fijarse el origen de la vida en un momento casi tan antiguo como el de la formación de la corteza terrestre.

El descubrimiento de microbios fósiles de hace 3400 millones de años, hecho por Barghoorn en Swazilandia, sugiere un hecho sorprendente: la transición de materia inanimada a bacterias llevó menos tiempo que la transición desde las bacterias a los organismos superiores que conocemos. La vida ha sido compañera de la Tierra desde poco después de los comienzos del planeta. La verdad es que la unión vital entre el medio ambiente de la Tierra y los organismos que la habitan hacen prácticamente imposible, incluso para los biólogos, dar una definición precisa de la diferencia entre substancia viva e inerte.

Al tener que enfrentarse con cambios, la vida se vio forzada, desde sus orígenes, a automantenerse. Las mismas fuerzas productoras de energía que causaron los enlaces químicos decisivos para la vida tendían a romperlos. Las primeras células no sólo tuvieron que atrapar energía para conservar su integridad frente a fuerzas hostiles; también necesitaron agua y alimento en forma de compuestos de carbono, hidrógeno y nitrógeno. El medio ambiente a su alrededor cambiaba continuamente. Aunque la reproducción sólo tuvo que aparecer una vez, fueron necesarios muchos pasos complicados para que se alcanzaran las distintas estrategias adaptativas. Cada impacto

de meteorito, emisión de gas volcánico, sequía e inundación representaba una crisis. La vida primigenia tenía dos opciones: mantener su integridad (utilizando la energía y fuentes de carbono a su alrededor) o desaparecer.

La apasionante empresa de investigar el desarrollo de las estrategias de supervivencia en el registro fósil, que ha fascinado a muchos científicos durante las últimas décadas, cuenta ahora con la ayuda de técnicas complejas y refinadas. Cortes translúcidos de cuarzo microcristalino, más finos que una hoja de papel, pueden ser observados con el microscopio óptico, de fluorescencia y de polarización. Utilizando las mejores condiciones, los microorganismos fosilizados se observan tan claramente que sólo un experto podría distinguirlos de bacterias vivas. Por ejemplo, *Eosynochococcus*, una bacteria fotosintética fósil de hace 2000 millones de años encontrada en la isla de Belcher en la bahía de Hudson (Canadá), es tan parecida a la bacteria moderna *Synechococcus*, obtenida en la superficie de una roca de Noruega, que resulta considerablemente difícil distinguir una de otra.

Hay otras maneras de estudiar las rocas antiguas, además del examen directo de los fósiles que contienen. Muy a menudo, los fósiles, incrustados en esquistos opacos, no se conservan muy bien; pero la materia orgánica de sus cuerpos sigue allí atrapada. A veces, esa materia orgánica puede ser liberada triturando las rocas y tratando los fragmentos con soluciones fuertes. El «extracto de roca» resultante es analizado por cromatografía de gases y espectroscopía de masas. Estas técnicas han llevado a la idea de «fósiles químicos». Los organismos vivos contienen, lógicamente, altas concentraciones de determinadas substancias químicas. Además, la utilización de unos mismos elementos químicos suele dar resultados distintos de los que se dan espontáneamente en meteoritos o de los que se obtienen en experimentos prebióticos. La presencia de determinados compuestos de carbono y de unas proporciones de isótopos de dicho elemento se toman como indicios de vida primigenia.

Afortunadamente la búsqueda de esos enigmáticos y poco frecuentes indicios en las rocas, así como su análisis, se ven ayudados por nuestro conocimiento, cada vez mayor, de la biología celular. Saber cómo trabaja una célula nos sugiere lo que hemos de buscar. Al investigar en el registro fósil las técnicas y sistemas de vida desde sus comienzos, los biólogos y paleontólogos han emprendido una búsqueda extrema que se adentra en los misterios del pasado microbiano de la vida. Estamos descubriendo una sorprendente y sencilla historia de los logros de la vida cuando ésta se encontraba aún en mantillas.

Probablemente las primeras formas de vida (esferas de un micrómetro de diámetro formadas por DNA, RNA, enzimas y proteínas) se parecían a los organismos más pequeños existentes hoy en día. Como la vida en sus principios, las mínimas estructuras vivientes parecen contener DNA con una capacidad limitada de metabolismo directo. No poseen suficientes genes como para poder fabricar todos los aminoácidos, nucleótidos, vitaminas y enzimas necesarios. Muchas de las formas estudiadas de estos tipos mínimos de bacterias son parásitos que obtienen lo que necesitan de los animales en los que viven. En la época en que la vida podía absorber sus componentes directamente a partir del medio ambiente, puede decirse que cubría gratis sus necesidades, utilizando las substancias químicas que se habían acumulado por la exposición de las mezclas de compuestos químicos a las radiaciones ultravioleta y a descargas eléctricas en ausencia de oxígeno.

Pero el festín de substancias químicas no duró mucho. En los nichos pequeños, aquellos nutrientes libres se agotaron rápidamente debido a que los microorganismos no cesaban de alimentarse, crecer y dividirse. Sin duda, en los primeros millones de años de existencia de la vida, en cada época de escasez, de cambio de clima o acumulación de contaminación a partir de los gases producidos por los mismos microorganismos, desaparecían algunas de las «manchas» de vida en la Tierra y, probablemente, en alguna ocasión casi todas. La vida habría fluctuado en ligero equilibrio según la proporción en que el Sol podía crear más nutrientes y pudo desaparecer completamente de manera rápida de no ser por una caracterís-

tica esencial: la capacidad del DNA de replicarse a sí mismo, formando, por tanto, copias de repuesto que podían cambiar alegremente de manera experimental.

Pero si la replicación del DNA es necesaria para la continuidad de la vida, no es suficiente para los procesos evolutivos. Se precisa de la mutación para que se dé la «descendencia con modificación» darwiniana. Los microorganismos, por su gran número y pequeñísimo tamaño, responden de manera relativamente rápida a bastantes cambios de cierta importancia en el medio ambiente. Se reproducen sin problemas si disponen de alimento y energía a su alrededor. Las bacterias rápidas pueden dividirse aproximadamente cada veinte minutos, produciendo en principio 2^{144} individuos cada dos días.[19] Este número es mucho mayor que el número de personas que han vivido desde el origen del ser humano. En cuatro días de crecimiento ilimitado habría 2^{288} bacterias. Este número es realmente mayor que el número de protones (aproximadamente 2^{266}) o «quarks» que, según los físicos, existen en el universo, y es útil para recordar al lector la naturaleza de la reproducción exponencial.

Aproximadamente en una de cada millón de divisiones, la célula hija no es igual a la célula madre. (Las bacterias, al reproducirse de manera asexual por división simple, sólo tienen una célula madre.) La mayor parte de mutantes se encuentran en peores circunstancias que la célula madre y mueren. Pero una sola bacteria mutante que tenga éxito puede expandirse rápidamente por el medio ambiente.

Riesgos habituales del medio ambiente, como variaciones en la temperatura, calidad y cantidad de luz solar, concentración de sales en el agua, causan variabilidad en las poblaciones de bacterias en distintos lugares. En cuanto el alimento escaseó en la pátina del planeta se empezó a acumular una variedad de bacterias prósperas con nuevos *semes:* nuevas vías metabólicas que permitían la obtención de alimento y energía a partir de varias materias primas.

Una de las primeras innovaciones permitía a las células la utilización de azúcares y la conversión de éstos en energía en forma de ATP. Los productos derivados de los azúcares que tenían menor energía (alcoholes y ácidos) eran excretados como productos residuales. El DNA absorbe los rayos ultravioleta procedentes del Sol. Como la luz solar rompía el DNA de las bacterias, las que podían hacerlo permanecían en el lodo y en el agua, lejos de la superficie iluminada. Eran células que vivían de las substancias químicas que había en la Tierra; desarrollaron diversos procesos de descomposición de los azúcares, conocidos como fermentaciones, que siguen funcionando sin ningún cambio en la actualidad. Las células pueden empezar con azúcares sencillos (glucosa, sacarosa) o con hidratos de carbono (que son cadenas de azúcares más complejas, como la celulosa y el almidón). Los organismos fermentadores pueden empezar también a partir de simples compuestos de nitrógeno, como los aminoácidos, o a partir de alcoholes y ácidos. Pueden acabar con dióxido de carbono y etanol, como las bacterias que fermentan los ingredientes para la formación del vino, cerveza y licores; con ácido láctico, como las que fermentan la leche y producen algunos tipos de quesos; o con ácido acético y etanol, como las que crecen en aguas residuales o las que producen el vinagre. El proceso de fermentación generalmente proporciona a la célula varias moléculas de ATP a partir de cada molécula de alimento descompuesta.

Pero la eficiencia de la fermentación no es la máxima posible, ya que sus productos residuales aún contienen energía. Con el tiempo, otras bacterias evolucionaron y consiguieron digerir los desechos de la fermentación, descomponiéndolos y obteniendo más carbono y energía a partir de aquéllos. Las bacterias que crecen en los desechos de otras bacterias se parecen a los actuales campeones devoradores de excrementos: los escarabajos peloteros y los hongos que crecen en el estiércol. Cadenas fermentativas de ese tipo aún se dan en lodos de pantanos y lagos, así como en zonas cercanas al mar afectadas por la acción de las mareas. También se encuentran en el intestino de ciertos animales y en charcos; en fin, en cualquier lugar donde haya algo para fermentar y donde la cantidad de oxígeno y de luz sean bajas. Lo que para un fermentador constituía un alimento era una substancia desechable para otro.

Se establecía un proceso cíclico de transformaciones de compuestos de carbono liberadoras de energía en que unos organismos transformaban el alimento en productos que eran, a su vez, utilizados por otros para producir de nuevo alimento. La fermentación es un proceso que nunca se ha perdido. Cuando hacemos un gran esfuerzo, por ejemplo al subir corriendo unas escaleras, nuestras células por un momento abandonan su típico metabolismo de utilización de oxígeno y vuelven a la vía fermentativa. Aunque es una manera menos eficiente de obtención de ATP, el metabolismo fermentativo aún perdura en nuestro organismo.

Uno de los más importantes fermentadores que recuerdan más la vida primigenia (una forma de bacterias conocidas como clostridios) desarrolló también la función vital de tomar nitrógeno atmosférico y convertirlo en la cadena lateral nitrogenada de los aminoácidos, nucleótidos y otros compuestos orgánicos. La fijación del nitrógeno requiere una gran cantidad de energía: de seis a dieciocho moléculas de ATP por cada molécula de nitrógeno. Para conseguirlo de manera industrial (por ejemplo, en la producción de abonos vegetales) se necesita una presión de 300 veces, como mínimo, la presión atmosférica a 500 grados centígrados. Ningún animal o planta es capaz de tal proeza; en realidad, ni siquiera la mayoría de microorganismos. Todos los seres vivos dependen para su existencia de las bacterias fijadoras de nitrógeno. Además, sin esta actividad de captación directa del nitrógeno atmosférico, la vida en la Tierra habría desaparecido hace tiempo debido a la falta de dicho elemento. Lejos de formar parte de las proteínas de todas las células como en la actualidad, el nitrógeno se habría hecho inaccesible, quedando atrapado en el aire como un gas inerte. Actualmente, la fermentación libera pequeñas cantidades de nitrógeno del interior de las células hacia la atmósfera; afortunadamente, los fijadores de nitrógeno lo devuelven a los seres vivos. Si el mundo de los seres vivos no hubiese conservado la estrategia bacteriana de la fijación de nitrógeno, habríamos perecido todos debido a su carencia. Los clostridios, los rizobios, los miembros del grupo *Azotobacter* y otras bacterias semejantes siguen proporcionando a toda la biosfera los compuestos de nitrógeno que le son imprescindibles, evitando, así, una carencia nutritiva irreversible a escala planetaria.

Naturalmente, las poblaciones de fermentadores que se desarrollaban seguían dependiendo de compuestos producidos en el medio ambiente para su alimentación, aunque algunas podían utilizar, además, anhídrido carbónico de la atmósfera. Sin embargo, cuando los compuestos orgánicos prebióticos se fueron consumiendo y empezaron a escasear, las presiones se hicieron más intensas. En los antepasados de un grupo de bacterias conocidas como *Desulfovibrio* surgió otra vía metabólica. Estas bacterias pueden respirar sulfato y emiten gases de azufre nocivos. Durante el paso de sulfato a sulfuro generan ATP, la molécula almacenadora de energía. Aquellas bacterias tomaban el sulfato del medio ambiente y liberaban sulfuro de hidrógeno, el mismo gas maloliente que en la actualidad da al lodo de las ciénagas y a algunos manantiales de aguas termales su característico olor a huevos podridos. Al respirar sulfato, los *Desulfovibrio* sintetizaban una clase de molécula llamada anillo porfirínico, que transfería electrones y generaba ATP. Las posibilidades metabólicas de los *Desulfovibrio* nunca desaparecieron. Su capacidad de producción de porfirinas ha sido mantenida, reutilizada y modificada por todo tipo de formas de vida, incluyendo el ser humano. Moléculas relacionadas con la porfirina, de color rojo brillante, circulan hoy por nuestra sangre transportando oxígeno hasta nuestras células.

Con la producción del anillo porfirínico en su repertorio, muchos tipos de bacterias adquirieron la capacidad de utilizar la fuente de energía más segura y abundante: la luz solar. Cuando una molécula cualquiera absorbe luz, sus electrones son elevados a un estado de energía más alto. Normalmente, la energía se desprende en forma de luz o de calor hasta que la molécula vuelve a su estado normal. Pero cuando las moléculas van unidas a porfirinas ligadas a proteínas, incrustadas a su vez en membranas como cadenas transportadoras de electores, la energía luminosa puede ser retenida para su posterior

utilización. Muchos tipos de bacterias pueden conservar la energía luminosa para convertirla en energía del ATP, que es utilizada luego para el movimiento y procesos de síntesis; por ejemplo, para la transformación del dióxido de carbono de la atmósfera en los compuestos de carbono nutritivos y replicativos necesarios para la autoconservación y el crecimiento. Este proceso de obtención de alimento a partir de la luz y el aire (fotosíntesis), liberó completamente a algunos tipos de bacterias de su dependencia de compuestos orgánicos formados con anterioridad.

La evolución de la fotosíntesis es, sin duda, la innovación metabólica individual más importante en la historia de la vida en el planeta, y no se originó en las plantas, sino en las bacterias. La fotosíntesis primigenia era distinta de la que se realiza actualmente en los vegetales. Los primeros organismos fotosintéticos eran bacterias que utilizaban el hidrógeno atmosférico o el sulfuro de hidrógeno y nunca producían oxígeno. Las bacterias que crecían a la luz del sol tomaban directamente de la atmósfera el hidrógeno necesario para combinar con el carbono. El hidrógeno era predominante en el Arqueense, cuando el sol acababa de «encenderse» y había empezado a liberar hacia el espacio grandes cantidades de aquel elemento. El sulfuro de hidrógeno, un gas producido por los volcanes, también abundaba más en la Tierra primitiva que en la actualidad. Con el tiempo, a medida que el hidrógeno disminuía, llegando incluso a desaparecer en nichos locales, fueron más las bacterias fotosintéticas que utilizaron el sulfuro de hidrógeno producido como desecho por las bacterias fermentativas y por las que respiraban sulfatos. Las bacterias fotosintéticas, entonces y ahora, utilizaban la energía luminosa para romper las moléculas de hidrógeno y acumulaban azufre en forma de unos extraños gránulos extracelulares. Sus descendientes actuales, conocidos como bacterias verdes y rojas del azufre, siguen manteniendo esta vía metabólica.

Al necesitar luz, los microorganismos que podían desplazarse para prolongar al máximo su exposición se encontraban en situación ventajosa. Entonces empezó el comportamiento. Incluso en aquellos tiempos tan remotos, se desarrolló una

combinación de movimiento y sencillos sistemas de sensibilidad química para detectar alimentos y evitar venenos.

El origen del desplazamiento rápido en las bacterias parece estar relacionado con un dispositivo rotatorio que es desconocido en las células con núcleo. Un flagelo, o filamento en forma de látigo, va adherido a una base en forma de disco. La base redonda, conocida como motor de protones, es en realidad giratoria y se mueve propulsada por cambios de carga eléctrica. El flagelo, constituido por proteínas específicas, al ir unido a este volante orgánico también gira de manera natural. Por regla general, el volante y el flagelo son exteriores al organismo procariota. Pero en algunas bacterias, como las espiroquetas, el flagelo penetra en la célula. Observadas al microscopio, las espiroquetas tienen aspecto de diminutos sacacorchos animados. Las primeras bacterias fueron microorganismos fermentativos que debieron de evolucionar en una época muy temprana de la historia de la vida. Uno de los tipos más frecuentes fue el de las espiroquetas de rápidos movimientos e intolerancia al oxígeno, que presentan un interés especial y volverán a aparecer en nuestra narración más adelante.

Las bacterias que adquirieron la capacidad de desplazarse con mayor rapidez se encontraban en situación ventajosa, como los seres humanos que se desplazan en automóvil. Un mayor acceso a distintos lugares significaba más oportunidades. De la misma manera que no hace falta aprender un nuevo oficio si uno puede desplazarse en coche a aquel lugar en que se le ofrece la posibilidad de seguir con el mismo que se tenía antes, así las bacterias que se desplazaban con rapidez no necesitaban desarrollar nuevos metabolismos. Sencillamente, nadaban hacia aquellos lugares que eran ricos en los nutrientes apetecidos y seguían utilizando su mismo viejo metabolismo. Estas bacterias, además, estaban más expuestas al contacto con genes y organismos externos y, por lo tanto, podían desarrollar uniones simbióticas intrincadas en una amplia variedad de ambientes.

Las bacterias que utilizaban la luz no podían enterrarse en el barro para protegerse de las radiaciones ultravioleta todavía

abrasadoras, pues se habrían visto privadas de la misma luz que necesitaban. Lo que hicieron fue buscar filtros. Vivían en soluciones ricas en determinadas sales, tales como el nitrato sódico, o se filtraban bajo la arena u otras substancias que absorbieran los rayos ultravioleta pero dejasen pasar la luz visible. Se «bronceaban» por medio de pigmentos que absorbían los rayos perjudiciales. Y crearon las sombras al formar colonias tan grandes que llegaron a alterar el aspecto del mundo visible.

Desde el principio, en la Tierra recubierta de agua, colonias de distintos tipos de bacterias cooperaron para formar comunidades que se hicieron visibles como espumas pegajosas, parches rojos y pardos, y extraños tapetes de distintas capas. Generación tras generación, las bacterias de los niveles superiores morían por la exposición a las radiaciones, pero sus restos protegían a los niveles inferiores, que acumulaban arena y sedimentos para formar una especie de alfombra viva. Los tapetes microbianos y lodos dominaban los paisajes acuosos y llanos del Arqueense. Aún se pueden encontrar en nuestros días (son unos bloques fibrosos tan gruesos que pueden cortarse con un cuchillo) en lugares como las cálidas costas de la Baja California, la costa mediterránea española, el golfo Pérsico, el oeste de Australia e incluso, estacionalmente, a lo largo de la costa atlántica de Estados Unidos, entre Nueva Escocia y Carolina del Sur. Sin importancia aparente y dominados por aquellos magníficos paisajes, aquellos tapetes son ejemplos vivos, conservados virtualmente intactos a través del tiempo, de un antiguo imperio puramente bacteriano.

Además del filtro protector había otra estrategia excelente para sobrevivir a los rayos perjudiciales del antiguo Sol: el desarrollo de mecanismos para la reparación del DNA dañado, lo que terminó siendo un poderoso instrumento para la construcción del microcosmos y del resto de la biosfera que surgió de él. Por ejemplo, una manera corriente de destrucción del DNA bacteriano por luz ultravioleta es la producción de dímeros de timina. Este nucleótido, en vez de aparearse con su complemento, la adenina, se aparea consigo mismo, enredando la molécula de DNA hasta el punto de inutilizarla. El resultado es la muerte, a menos que actúen enzimas reparadores arreglando la confusión. Estos enzimas eliminan la porción dañada —el dímero de timina— y copian de nuevo un DNA sano para reemplazarla. En otras palabras, las bacterias amenazadas por las radiaciones ultravioleta desarrollaron la «soldadura» del DNA, un mecanismo que se utiliza actualmente en laboratorio y que se conoce como ingeniería genética. Prácticamente todos los organismos actuales poseen aún enzimas reparadores, aunque desde hace 2000 años la vida está protegida de los dañinos rayos ultravioleta por una capa de ozono atmosférico. En muchas bacterias actuales los enzimas reparadores tienen que ser activados con luz.

La presión para reparar el DNA dañado y evitar así la muerte indujo el desarrollo de los sistemas reparadores de DNA. A veces, en vez de utilizar copias sanas de su propio material genético, las bacterias que vivían muy apiñadas tomaban el DNA de sus vecinas. En las bacterias actuales, una información genética parcial en forma de segmentos variados de DNA puede pasar de unas cepas bacterianas a otras. Aunque el intercambio es más fácil entre bacterias metabólicamente semejantes, cada cepa puede, en potencia, recibir genes de cualquier otra a través de una sucesión de intermediarios. Esto permite que la información genética sea distribuida en el microcosmos con una facilidad y velocidad semejantes a las de las modernas técnicas de telecomunicación, si se considera la complejidad e importancia biológica de la información transferida. Con el intercambio de genes, las poblaciones de bacterias están preparadas para su función en su ambiente particular y los individuos se transmiten el patrimonio genético unos a otros.

Al adaptarse a las duras condiciones impuestas por la luz solar, el microcosmos inventó el sexo. Aunque aquel primer tipo de sexualidad era distinto del de los animales, no dejaba de ser la misma cosa. Sexo, tal como lo recogen los biólogos, es la mezcla o unión de genes de procedencia distinta. No debe identificarse con la reproducción, ya que un organismo viejo puede recibir nuevos genes y tener, por tanto, actividad sexual sin reproducirse. El sexo implica siempre, como mí-

nimo, un organismo vivo, pero la segunda fuente de genes no tiene por qué estar viva; puede ser un virus o incluso DNA en un tubo de ensayo.

En la Tierra primigenia llegó un momento en que una bacteria reemplazó parte de sus genes dañados por el Sol por otros sanos procedentes de un virus, una bacteria viva, o incluso por DNA viejo y desechado procedente de una célula muerta. Aquella bacteria tenía sexo. Más fluido y más frecuente que el sexo meiótico de «esperma y óvulo» de los animales, que queda circunscrito al proceso de reproducción, el sexo de las bacterias aumentó inconmensurablemente la complejidad del microcosmos. Al poder mezclar genes en cualquier momento y no verse limitadas a hacerlo exclusivamente en el momento de la reproducción, las bacterias son genéticamente más promiscuas que los animales.

Dado que la transferencia genética bacteriana no depende de la reproducción, cuesta un poco captar esta idea. Al principio de la actividad sexual bacteriana hay dos individuos, pero al final normalmente sólo hay una célula resultante: la misma célula madre, la bacteria recombinante que ahora lleva genes de dos procedencias distintas. Sin necesidad de reproducirse, la bacteria puede llevar un 90 por ciento de nuevos genes. Este primer tipo de sexo, más casual y requerido inmediatamente para la supervivencia en ambientes que de otra manera resultarían hostiles, es realmente muy distinto de la clase de sexo relacionado con la reproducción que se da en animales y en vegetales. La sexualidad bacteriana precedió a la sexualidad animal en, al menos, 2000 millones de años y, como un triunfo de la baraja, permitió a todo tipo de bacterias continuar en el juego evolutivo.

5
Sexualidad e intercambio genético a escala planetaria



El primer tipo de sexualidad que apareció en nuestro planeta, tanto la transferencia genética al estilo bacteriano como la explotada por la ingeniería genética, fue y es muy importante para el funcionamiento más básico de la vida. Aunque algunos autores se atreven a sostener que la sexualidad precedió al origen de las células, ésta debe de haberse originado en algún momento del eón Arqueense, hace más de 3000 millones de años. Realmente, el sexo procariótico se trama a través del desarrollo de la vida en la Tierra y proporciona la clave para comprender su historia. La sexualidad al estilo bacteriano se haría importante posteriormente al ser una manera de mantener juntas funciones simbióticas entre organismos muy distintos. Y fue siempre crucial para el «tiempo de reacción» de la biota; es decir, para su capacidad de responder con rapidez a los cambios ambientales y las situaciones críticas.

En su sentido más amplio, la sexualidad es, sencillamente, la recombinación de genes de origen distinto. Debido a que en nuestro mundo de vertebrados dicha recombinación de genes es vital para el proceso de reproducción por medio de gametos masculinos y femeninos (espermatozoides y óvulos), nos resulta difícil separar los conceptos de sexualidad y reproducción. La sexualidad, en realidad, no es necesaria para la mayoría de miembros de cuatro de los cinco reinos en que se dividen los seres vivos.

Las bacterias se reproducen asexualmente duplicando primero su tamaño, replicando su único filamento de DNA y dividiéndose luego, con una copia del DNA en cada una de las células resultantes. También pueden reproducirse por gemación: una pequeña célula provista de una dotación genética completa se forma sobre la célula madre y cuando se separa va creciendo hasta alcanzar el tamaño adulto. El DNA también puede encerrarse en una espora que puede sobrevivir largos periodos de sequía o de condiciones adversas, para germinar de nuevo cuando la condición de humedad vuelve o cuando el ambiente se hace más favorable.[20]

En cualquier caso, el intercambio genético continúa independientemente de estos procesos reproductivos, que no lo requieren en absoluto. En realidad, la sexualidad de los mamíferos es una rareza en el mundo de los seres vivos. Al ir ligada y depender del proceso de reproducción, no llega a ser tan importante para la biosfera como la sexualidad de tipo bacteriano. Esta última, que no ha de esperar a la reproducción y puede darse virtualmente en cualquier momento, es el hilo común que enlaza muchas observaciones realizadas en campos tales como la bacteriología, la medicina y la biología molecular, observaciones que a primera vista podría parecer que no guardan ninguna relación entre sí.

Los bacteriólogos han observado durante mucho tiempo que los microorganismos se transmiten libremente caracteres hereditarios de unos a otros. En 1928 Frederick Griffith ya descubrió que los neumococos vivos podían adquirir caracteres hereditarios de otro tipo de neumococos, aunque estos últimos estuvieran muertos. En 1944 Oswald T. Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty publicaron un descubrimiento sorprendente, tan decisivo y distinto de lo que sus colegas esperaban que fue acogido con indiferencia y no se le dio importancia hasta más tarde.[21] Aquellos investigadores probaron, dejando fuera de cualquier duda, que el responsable de la adquisición hereditaria de los caracteres de los neumococos muertos era el DNA y no una proteína. Es decir, las células infecciosas, aunque estuviesen muertas, podían tener actividad sexual y transferir sus genes con tal de que su DNA se mantuviera intacto. Aquellos científicos neoyorquinos mostraron que la sustancia química que había detrás de esta «transformación» era un ácido nucleico: el ácido desoxirribonucleico, o DNA. Entender lo que había en este DNA procedente de organismos muertos que podía llegar a modificar las características heredadas en las bacterias se convirtió en una obsesión para un joven doctorando de Chicago llamado James D. Watson. Junto con el genial Francis Crick, Watson resolvió el enigma de la estructura química del DNA, descubriendo simultáneamente el secreto de su funcionamiento. Treinta años más tarde la estructura y función del DNA se han convertido en el foco de un campo completo de la ciencia que se vanagloria de contar con miles de personas trabajando en él: la biología molecular.

Los descubrimientos asombrosos sobre cómo se forma la doble hélice y sobre cómo cambian y experimentan mutaciones las moléculas orgánicas deslumbraron por igual la imaginación científica y la popular. Además, las conquistas médicas sobre varias bacterias infecciosas específicas atrajeron, como siempre, la atención del público. Fuera de la espectacularidad de la publicidad y en un relativo aislamiento, se realizaron observaciones de otros comportamientos microbianos, aunque poca gente consideraba los descubrimientos de la biología molecular, la bacteriología y la medicina como parte de un mismo fenómeno en la vida del microcosmos.

Cada una de estas disciplinas había explorado, y a veces explotado, el hecho de que cepas bacterianas naturales y diferentes estén constantemente intercambiando piezas y fragmentos de su material genético entre ellas de una manera más o menos aleatoria. El número de genes permanentes en cada célula bacteriana puede ser 300 veces menor que el de una célula nucleada típica (como las que forman nuestro cuerpo). Pero la debilidad puede ser fuerza: la otra cara de esta deficiencia genética es que hace el mundo bacteriano increíblemente más flexible, en términos de adaptación, que el nuestro de células nucleadas. Una bacteria posee tan sólo un filamento desnudo con un mínimo de instrucciones para su replicación y mantenimiento. La cepa bacteriana puede adquirir cualquier tipo de

capacidad de adaptación extra para sobrevivir en condiciones especiales. Unas partículas genéticas visitantes conocidas como replicones son las responsables de esta adaptación. Estos replicones, por medio de la sexualidad bacteriana, van de célula en célula. A veces se integran en el DNA bacteriano principal conocido como genóforo; otras veces actúan como una especie de satélite genético, separado del genóforo.

Todo esto no significa que una única bacteria tenga que beneficiarse necesariamente de un replicón visitante. Pero varios tipos de replicones pueden representar proporciones importantes de la composición de una bacteria; su influencia en la célula tiene posibilidades de ser muy importante. La transferencia genética difiere en las bacterias porque no necesitan esperar a la reproducción. Las bacterias no se alteran por recibir automáticamente un 50 por ciento de genes nuevos, que es lo que ocurre en la nueva generación de animales y plantas que se reproducen sexualmente. Paradójicamente, y contemplado desde la óptica de nuestro mundo humano, aunque los procariontes mantengan más a menudo un intercambio sexual y con más parejas, guardan una mayor fidelidad en términos de grados de semejanza entre progenitores e hijos.

El ser humano y la mayor parte de plantas y animales no pueden experimentar grandes cambios en su apariencia exterior o en su metabolismo por el simple hecho de recibir genes visitantes que codifican como máximo un tanto por ciento muy bajo de sus proteínas. El enorme número de células interconectadas que van sincronizadas en los animales y plantas compromete nuestro potencial genético. En el vertiginoso mundo del cambio genético bacteriano, los organismos mayores son operadores incómodos y repletos en exceso, que sólo pueden intercambiar parte de sus genes de una sola vez. No tienen grandes posibilidades para escoger a su pareja sexual. La especie humana y otras especies eucarióticas son como masas sólidas congeladas en un molde genético específico, mientras que el conjunto de genes bacterianos, móviles e intercambiables, es semejante a un líquido o un gas. Si se aplicaran las propiedades genéticas del microcosmos a criaturas de mayor tamaño, nos encontraríamos en un mundo de ciencia ficción

en que las plantas verdes podrían compartir sus genes para la fotosíntesis con las setas vecinas, o en el que las personas podrían exudar perfumes o producir marfil, consiguiendo los genes a partir de una rosa o de una morsa.

Sin embargo, en el microcosmos las consecuencias de la facilidad de intercambio genético son aún más sorprendentes, ya que, si todas las cepas bacterianas pueden compartir sus genes, podríamos decir, en el más estricto sentido, que en el mundo bacteriano no se dan las especies verdaderas. Cualquier bacteria es un organismo, una entidad capaz de llevar la ingeniería genética a escala global o planetaria. Según palabras de los bacteriólogos canadienses Sorin Sonea y Maurice Panisset, esa entidad es, efectivamente, «un tipo de clon único y complejo, compuesto por células (especializadas) altamente diferenciadas».[22]

La variedad de mecanismos para aquellos constantes intercambios oportunistas permite un sorprendente número de opciones. Además del filamento principal de DNA, que los bacteriólogos llaman genóforo, cromonema o gran replicón, una célula bacteriana contiene en todo momento un número de moléculas de DNA autorreplicantes, los pequeños replicones, procedentes de células de otras cepas bacterianas. Algunos de estos pequeños replicones pueden insertarse en el filamento principal de DNA celular y allí pueden dividirse al mismo tiempo que aquél o bien en distinto momento por sí mismos. Otros pequeños replicones flotan por el cuerpo celular o se adhieren a la membrana, dirigiendo la síntesis de proteínas con diferentes finalidades. Si la característica determinada por el pequeño replicón es útil, el gen que lo determina puede ser retenido por la célula atrapándolo en el gran replicón. De la misma manera, parte del gran replicón puede ser eliminada cuando deja de ser útil en un determinado ambiente.

Además de los pequeños replicones, fragmentos pasivos no replicantes de DNA pueden penetrar en la célula si en ella hay una zona receptora apropiada y, una vez en el interior, pueden reemplazar un fragmento similar en el gran replicón, lo que alteraría el mensaje genético. Algunos de estos fragmentos de DNA, llamados transposones, van provistos de se-

cuencias conectoras que permiten que se inserten libremente en cualquier replicón, grande o pequeño.

Se conocen pequeños replicones en sus diferentes formas y disfraces —plásmidos, episomas, profagos, fagos—, así como las diabólicas partículas que inyectan en nuestras células nucleadas: los virus. Cada tipo suele mostrar características distintas o una manera de actuar diferente; sin embargo, suelen coincidir en parte. Algunos pequeños replicones van provistos de un surtido de «herramientas»: genes que les permiten replicarse y ser transferidos a otras células, o que permiten a la célula hospedadora expresar la información de la cual son portadores. Por ejemplo, un profago en el interior de una bacteria puede replicarse muchas veces y, para convertirse en un virus, puede encerrar cada una de sus copias en una cápsula de proteína que luego se utiliza para adherir la copia a otra bacteria. La bacteria receptora, cuando está llena de virus maduros, se «lisa» o desintegra liberando los fagos lisógenos (nombre por el que se conocen ahora), para infectar otras bacterias, a veces después de haber sido transportados por el viento y las corrientes de agua lejos del lugar donde se originaron.

En el proceso conocido como transducción, un fragmento del DNA bacteriano o cualquier otro pequeño replicón presente puede ser encerrado en una cápsula de proteína y viajar hasta otra bacteria. Y en la conjugación, el DNA móvil causa la formación de un minúsculo tubo, llamado pelo o fímbria, entre dos células, El donante transfiere una copia de su DNA al receptor a través del tubo.

La transducción y la conjugación son los dos métodos más importantes para compartir la inmunidad a los fármacos en el mundo bacteriano. La velocidad de propagación de la resistencia a los fármacos de tipo hereditario en las comunidades bacterianas demuestra de modo impresionante el poder y eficacia de su red de comunicaciones. Por ejemplo, el gen que dirige la síntesis de una enzima que digiere la penicilina probablemente se originó en las bacterias del suelo. Por medio de intercambios por fagos llegó, finalmente, hasta los estafilococos de nuestros hospitales, muchos de los cuales ahora son extremadamente resistentes a la penicilina. Se ha calculado que un

organismo eucariota que necesitase una enzima semejante habría tenido que esperar alrededor de un millón de años de mutaciones aleatorias para producirlo. Por otra parte, la espiroqueta que causa la sífilis se muestra aún susceptible a la penicilina, quizá porque no ha recibido de otras bacterias los genes que la descomponen.

Debido a que su reducido número de genes la hace deficiente en sus capacidades metabólicas, una bacteria equivale necesariamente al jugador de un equipo; en la naturaleza nunca funciona como un individuo único. En cambio, en cualquier nicho ecológico dado conviven equipos de varios tipos de bacterias, respondiendo y reformando el medio ambiente, al contribuir cada uno con enzimas complementarios. Los distintos tipos de bacterias del equipo, presente cada uno con numerosos ejemplares, coordinan la liberación de sus enzimas según las fases de un proceso. Sus ciclos vitales se entrelazan y los productos residuales de un tipo sirven de nutrientes al siguiente. Las bacterias, actuando cada tipo distinto como una rueda de un engranaje, ocupan su medio ambiente y lo alteran radicalmente. En cantidades enormes y variables, realizan tareas que individualmente no podrían llevar a cabo.

Con otras cepas bacterianas que viven cerca unas de otras, siempre a punto para contribuir con genes útiles o con sus productos metabólicos, la eficacia del equipo en conjunto se mantiene en óptimas condiciones. Con el tiempo, esta selección natural hace que el equipo se estabilice y sea capaz de mantener un complejo metabolismo de grupo. Los equipos de bacterias representan para la Tierra lo que nuestros órganos internos para nosotros. Dispersos en cualquier rincón viable de nuestro planeta, como las células de la sangre en nuestras venas, la composición de un determinado equipo acaba ajustándose a las condiciones locales. Las disposiciones son dinámicas, a punto para cambiar o para empezar de una manera nueva si las condiciones del medio cambian. A veces (por ejemplo, en los hornos donde el carbón quema lentamente), los equipos mantienen incluso su propio microclima completo con control de la temperatura. Además, a través de la biosfera los equipos de bacterias establecen una influencia recíproca con distintas

plantas, animales y hongos del mundo eucariótico. Estos consorcios mayores también trabajan con la armonía dinámica de un organismo único.

Las tareas que realizan los equipos de bacterias son, nada menos, que el acondicionamiento del planeta entero. Son ellos los que evitan que la materia viva acabe convirtiéndose en polvo. Ellos convierten unos organismos en alimento para otros. Mantienen los elementos orgánicos e inorgánicos en el ciclo de la biosfera. Las bacterias purifican el agua de la Tierra y hacen los suelos fértiles. Perpetúan la anomalía química que es nuestra atmósfera, produciendo constantemente reservas nuevas de gases reactivos. James Lovelock, químico británico especializado en el estudio de la atmósfera, sugiere que algunos gases producidos por microbios actúan como un sistema de control para estabilizar el medio ambiente vivo. El metano, por ejemplo, puede actuar como un mecanismo regulador de oxígeno y ventilador de la zona anaeróbica (sin oxígeno), mientras que el amoníaco —otro gas que reacciona fuertemente con el oxígeno y que debe ser, por lo tanto, repuesto continuamente por los microorganismos— probablemente desempeña un papel más importante en la determinación de la alcalinidad de lagos y océanos. Es un gas de los llamados de «invernadero» (como el dióxido de carbono), que retienen las radiaciones produciendo, como consecuencia, un aumento de la temperatura del planeta, y puede haber tenido importancia en el control del clima en épocas pasadas. El cloruro de metilo, un gas del cual se encuentran restos en la atmósfera, puede regular la concentración de ozono en las capas más altas de aquélla, lo que, a su vez, afecta la cantidad de radiación que alcanza la superficie. Y esto influye en el crecimiento posterior de microorganismos productores de gas. Y así sucesivamente. El medio ambiente está tan entrelazado con las bacterias, y la influencia que éstas ejercen es tan intensa, que, en realidad, no hay manera de señalar con el dedo un punto y decir «aquí acaba la vida y aquí es donde comienza el reino inorgánico de la materia inerte».

El mundo bacteriano, efectivamente, ha detenido el tiempo en aquel punto en que un ser vivo no dependía del cuidadoso

paquete de DNA que se encuentra en los organismos con núcleo, sino que tenía muchas opciones abiertas. El DNA bacteriano y el RNA no quedaron atrapados en el núcleo de las células de las especies que se reproducen sexualmente, sino que se conservaron flexibles de una manera modular. En el mundo bacteriano, fragmentos de DNA independiente, suspendidos entre la vida y el mundo inanimado, constituyen un repertorio poderoso de herramientas para la empresa imparable de la evolución. Cuando un virus penetra en nuestras células y emite sus extrañas instrucciones, puede hacer estragos. Para las bacterias, sin embargo, y para aquellas partes de nuestras células que más recuerdan a bacterias, las intrusiones víricas y de otros tipos en su DNA son pura rutina y, en conjunto, tienen un significado adaptativo. En el microcosmos se van ensayando nuevas combinaciones continuamente y la evolución de esos cambios sustenta también la evolución de las capas no bacterianas de la biota.

A medida que la vida avanza por el camino de la senda eucariótica, se va haciendo más rígida y limitada, en un sentido fundamental. Para conseguir el tamaño macroscópico, la energía y los cuerpos complejos de que disfrutamos, nos valemos de la flexibilidad genética. Con la única posibilidad de intercambio genético sólo durante la reproducción, estamos encerrados en nuestra especie, en nuestro cuerpo y en nuestra generación. Como se expresa a veces en el lenguaje técnico, intercambiamos nuestros genes «verticalmente» (a través de las generaciones), mientras que los procariotas los intercambian «horizontalmente» (directamente con sus células vecinas en una misma generación). El resultado es que mientras que las bacterias genéticamente fluidas son funcionalmente inmortales, en los eucariontes la sexualidad va ligada a la muerte.

Con equipos de bacterias que crecen y mueren poblando toda localización posible en la superficie de la Tierra y seleccionando continuamente las mejores soluciones locales para resolver el problema de mantener la vida en un momento determinado, la superficie se mantiene en un estado estacionario y acogedor. Al estar formado por organismos vivos, el am-

biente es regulado continuamente por la vida y para la vida. El éxito supremo del intercambio celular para asegurar el máximo número de bacterias acaba aumentando el número de formas de vida, incluyendo animales y plantas, y acelerando todos los ciclos biológicos. Además, en su alianza con animales y vegetales, que no podrían vivir sin ellas, las bacterias de la Tierra forman un completo sistema regulador planetario,[23] cuyo efecto específico es estabilizar las proporciones de gases atmosféricos reactivos y cuyo resultado general es mantener la Tierra habitable. Los humanos no podrán nunca apreciar esta proeza de ingeniería genética hasta que exploradores espaciales traten de colonizar Marte o hagan los satélites habitables en una base continua, que es lo que las bacterias han venido haciendo en la Tierra a lo largo de toda su larga historia.

Sonea y Panisset comparan las numerosísimas actividades del superorganismo que representa el conjunto de todas las bacterias del planeta con las funciones de un ordenador que poseyera un enorme banco de datos (los genes bacterianos) y una red de comunicaciones global que procesara «información más básica que el cerebro de cualquier mamífero».[24] Hacen hincapié en la dispersión universal de la resistencia a los antibióticos como una prueba espectacular de que «las bacterias actúan como una entidad única capaz de resolver problemas complejos y de resolverlos siempre con eficacia». La inteligencia humana, al haber evolucionado con el superorganismo bacteriano y haber sido estimulada por él, utiliza técnicas muy similares para resolver problemas y transmitir información. Estos mismos autores ofrecen dos analogías: al igual que los microorganismos, el ser humano posee muchas herramientas y sabe cómo utilizarlas, pero no las lleva encima continuamente. Asimismo, el ser humano puede transmitir información a sus hijos y a sus vecinos, de la misma manera que las bacterias transmiten los genes en sentido vertical a su descendencia y en sentido horizontal a otras bacterias. Por consiguiente, la humanidad y el microcosmos poseen una reserva cada vez mayor

de conocimientos técnicos. El conocimiento adquirido no muere con el individuo o con su generación.

El primer conocimiento que tuvimos del microcosmos fue hostil. Pestes, lepra, enfermedades venéreas a lo largo de la Edad Media forzaron a los pensadores a reconocer, por lo menos de manera intuitiva, el fenómeno de la transferencia genética universal. Se describió el estilo de vida bacteriano en el momento y en el lugar en que representaban una amenaza para la sociedad humana. Las antiguas ideas sobre la existencia de personas impuras o incluso poseídas y los descubrimientos posteriores a la Edad Media en relación a la higiene y antibióticos en la lucha contra la enfermedad representan el frente en que se encontraron por primera vez el intelecto humano y el antiguo microcosmos del planeta. Louis Pasteur (1822-1895), que probó el origen microbiano de enfermedades tan devastadoras como la glosopeda, la peste y la podredumbre de la vid, estableció el tipo de relación desde el principio. El contexto del encuentro entre intelecto y bacterias definió la medicina como un campo de batalla: las bacterias eran vistas como «gérmenes» que había que destruir. Sólo en la actualidad hemos empezado a apreciar el hecho de que las bacterias son normales y necesarias para el cuerpo humano y que la salud no es un asunto tanto de destruir microorganismos como de restablecer las apropiadas comunidades de bacterias. Sólo en la actualidad hemos empezado a apreciar el aspecto beneficioso de la infección, el patrimonio de características deseables que se explota en la ingeniería genética.

Los sistemas de información humanos apenas han empezado a enfocar la cuestión de los antiguos sistemas bacterianos que han estado intercambiándose información como una red de ordenadores con una memoria acumulada durante miles de millones de años de funcionamiento continuo. Si vamos más allá de la visión puramente médica de los microorganismos y tratamos de considerarlos como nuestros antepasados, como los seres vivos más antiguos de la Tierra, nuestros sentimientos cambiarán, y de sentir miedo y odio hacia ellos pasaremos a respetarlos y tratarlos con consideración. Las bacterias inventaron la fermentación, la rueda en forma del motor rotatorio de pro-

tones, la respiración del azufre, la fotosíntesis y la fijación del nitrógeno mucho antes de que se iniciara nuestra propia evolución. No son únicamente seres con un destacado comportamiento social, sino que, además, actúan como una especie de democracia universal descentralizada. Las células permanecen básicamente separadas, pero pueden ponerse en contacto e intercambiar genes con organismos con un historial muy alejado del suyo. La comprensión de que los individuos humanos también pueden permanecer básicamente separados pero pueden entrar en contacto e intercambiar conocimientos con otros muy distintos representa dar un paso hacia la antigua sabiduría del microcosmos.

Aunque estamos apenas empezando a conocer su existencia, el microcosmos representa una gran reserva para nosotros. La transición de una sociedad industrial de motores de carbón y vapor a una sociedad postindustrial de televisores y ordenadores ha sido comparada a la diferencia entre el cerebro y la fuerza muscular. Lo mismo ocurre con los recursos de la Tierra. De la misma manera que hemos explotado la energía encerrada en los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) con millones de años de antigüedad, podemos utilizar las fuentes de información con *miles de millones* de años de antigüedad. La microelectrónica molecular de la fotosíntesis, la ingeniería genética, el desarrollo embrionario y otras tecnologías naturales nos aguardan. La posibilidad de acceder a toda la información almacenada, familiarizándonos con sus misterios, conduciría a cambios tan sorprendentes que se encuentran más allá de nuestros conocimientos actuales.

En vísperas del Proterozoico, hace 2500 millones de años, no había rincón sobre la superficie de la Tierra en que no pularan las bacterias. La vida había respondido a las radiaciones ultravioleta con la sexualidad y esta infección benigna, este germen de inteligencia, había ayudado a la vida a diseminar sus inventos útiles. En el Proterozoico ya se habían inventado miles de mecanismos metabólicos, sin duda todos los más importantes que se conocen en la actualidad. Por ejemplo,

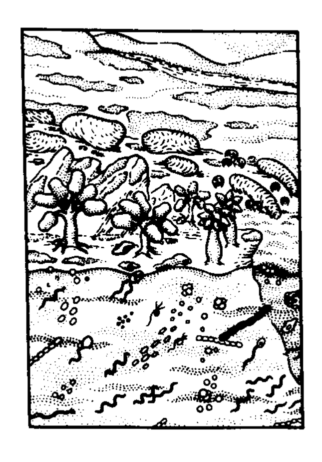
los pigmentos carotenoides anaranjado brillante o púrpura y la vitamina A, compuestos que protegen contra los efectos traidores de la luz intensa, estaban ya en poder de determinadas bacterias. En el mundo moderno los carotenoides dan a las zanahorias su color anaranjado y la vitamina A es ahora un precursor químico en el proceso corporal de producción de rodopsina, el pigmento visual de nuestros ojos. Muchos de aquellos inventos del microcosmos no se han perdido nunca.

A un observador casual, el mundo del Proterozico temprano le habría parecido en su mayor parte llano y húmedo, un paisaje extraño y al mismo tiempo familiar, con volcanes humeantes en el fondo y charcas de aguas poco profundas y de colores brillantes y con misteriosas manchas de espuma verdosas y parduscas flotando sobre las aguas, adheridas a las orillas de los ríos y dando a los suelos húmedos un aspecto mohoso. Un brillo rojizo cubriría las aguas hediondas. Descendiendo hasta la perspectiva microscópica, un fantástico paisaje de esferas de color púrpura, verde mar, rojo y amarillo se ofrecería a la vista. En el interior de las esferas violetas de *Thiocapsa,* glóbulos amarillos en suspensión desprenderían burbujas de un gas fétido. Colonias de viscosos organismos envueltos en una cápsula se extenderían hacia el horizonte. Con un extremo adherido a la roca, algunas bacterias empezarían a penetrar en ella, introduciéndose a través de grietas diminutas. Largos y delgados filamentos abandonarían a sus hermanos deslizándose despacio en busca de un lugar mejor al sol. Serpenteantes látigos bacterianos en forma de sacacorchos o de tirabuzón se moverían vertiginosamente. Filamentos multicelulares y pegajosos amasijos de células bacterianas formando un tejido se agitarían con las corrientes, revistiendo piedras con brillantes sombras de rojo, rosa, amarillo y verde. Lluvias de esporas transportadas por la brisa caerían estrellándose contra la vasta frontera de los fondos cubiertos de barro y agua.

Todos los seres de esta extinguida biosfera eran procariontes, es decir, carecían de núcleo. Sus genes no estaban agrupados en cromosomas envueltos por una membrana nuclear. Probablemente habían evolucionado y se habían distribuido los sistemas metabólicos y enzimáticos más importantes. El reci-

clado de gases y compuestos solubles a través de la atmósfera y del agua creó los fundamentos del ecosistema planetario. Aunque la revolución del oxígeno que estaba por llegar iba a conducir a aquellos anaerobios del Arqueense a zonas bajo tierra y bajo el agua, muchas bacterias que vivían entonces han sobrevivido sin cambios esenciales durante más de tres mil millones de años.

6 El holocausto de oxígeno



El holocausto de oxígeno fue una crisis de contaminación a escala mundial que ocurrió hace unos 200 millones de años. Antes apenas había oxígeno en la atmósfera terrestre. La biosfera original de la Tierra era tan distinta de la actual como ésta pueda serlo de la de otro planeta. Pero las bacterias fotosintéticas rojas y verdes, en su desesperada búsqueda de hidrógeno, descubrieron una fuente esencial de ese elemento, el agua, y su uso las llevó al residuo tóxico último, el oxígeno. Nuestro valioso oxígeno fue al principio un veneno gaseoso vertido a la atmósfera. La aparición de la fotosíntesis productora de oxígeno y el medio ambiente resultante, rico en oxígeno, pusieron a prueba la inventiva de los microorganismos, especialmente de los que producían oxígeno y de los que carecían de movilidad, incapaces de escapar al nuevo gas tan abundante y reactivo por medio del desplazamiento. Los microorganismos respondieron inventando diversos mecanismos intracelulares y descomponedores para desintoxicar y acabar utilizando el peligroso contaminante.

La incesante demanda de hidrógeno marcó el inicio de la crisis. La necesidad que los seres vivos tenían de compuestos hidrocarbonados había terminado casi por completo con el dióxido de carbono de la atmósfera. (Las atmósferas de Marte y Venus tienen aún en la actualidad más de un 95 por ciento de dióxido de carbono; la Tierra sólo un 0,03 por ciento.) El

hidrógeno, gas más ligero, siguió escapándose hacia el espacio, donde reaccionó con otros elementos, lo que le hizo aún menos disponible. Incluso el sulfuro de hidrógeno, que era expulsado por los volcanes, se había hecho insuficiente para las extensas comunidades de bacterias fotosintéticas que a finales del Arqueense dominaban suelos y mares.

Pero la Tierra aún disponía en gran cantidad de una abundante fuente de hidrógeno: óxido de dihidrógeno, es decir, agua. Hasta entonces, los fuertes enlaces entre los átomos de hidrógeno y oxígeno de la molécula de agua (H_2O), que eran aún más fuertes que los que mantienen juntos los dos átomos de hidrógeno de la molécula de este gas (H_2), del sulfuro de hidrógeno (H_2S) o de moléculas orgánicas (CH_2O), habían sido imposibles de romper por las ingeniosas bacterias ávidas de hidrógeno. Sin embargo, algún tiempo después de que se estableciera la fotosíntesis en la atmósfera pobre en oxígeno de la Tierrra primitiva, un tipo de bacterias azules resolvieron para siempre la escasez de hidrógeno. Eran los antepasados de las modernas cianobacterias.

Estos antepasados de las cianobacterias parece que debieron de ser bacterias del azufre mutantes que se arriesgaron para continuar viviendo cuando disminuyó la reserva de sulfuro de hidrógeno de que disponían. Aquellos organismos ya eran fotosintéticos y ya tenían en su interior proteínas organizadas en las llamadas cadenas de transporte de electrones. En algunas de las bacterias azules se duplicó el mutante de DNA que codificaba las cadenas de transporte de electrones. Como ya estaban especializadas en captar la luz solar en su centro de reacción para generar ATP, el nuevo DNA llevó a la construcción de un segundo centro de reacciones fotosintéticas. Este segundo centro también absorbía luz utilizando energía de los electrones generados por la luz en el primer centro; pero se trataba de luz de mayor energía, absorbida a longitudes de onda menores, que podía descomponer la molécula de agua en el hidrógeno y oxígeno constituyentes. El hidrógeno era atrapado rápidamente y añadido al dióxido de carbono atmosférico para fabricar substancias químicas nutritivas de tipo orgánico, como los azúcares. En una innovación evolutiva que creemos

sin precedentes en el universo —por lo que nosotros sabemos— los alquimistas azules, utilizando luz como fuente de energía, extrajeron hidrógeno de una de las fuentes más ricas del planeta: la misma agua. Este simple cambio metabólico en organismos tan diminutos tuvo importantes consecuencias para el futuro de la historia de toda la vida en la Tierra.

El nuevo sistema doble alimentado con energía luminosa no sólo generaba más ATP, sino que podía acceder a una fuente de hidrógeno casi inagotable. Las primeras cianobacterias, al adoptarlo, consiguieron éxitos espectaculares. Colonizando cualquier rincón disponible que asegurara la disponibilidad de luz solar, dióxido de carbono y agua, se diseminaron por toda la superficie de la Tierra. Hoy crecen como malas hierbas sobre rocas, superficies de piscinas, fuentes de agua potable, cortinas de ducha, suelos arenosos; en cualquier parte que haya agua y luz. Cuando a finales de los setenta se abriera al público las cuevas de Lascaux en el sur de Francia, cuyas paredes conservan pinturas hechas por cazadores paleolíticos, enseguida tuvieron que ser cerradas de nuevo. En cuanto la luz y el agua pudieron penetrar allí las cianobacterias empezaron a crecer y dividirse amenazando con cubrir las superficies de las pinturas rupestres de más de 40 000 años de antigüedad.

En la Tierra primitiva el tinte verde azulado fue cubriendo poco a poco substratos minerales y barros. Se deslizó, creció, se arrastró e hinchó, expandiéndose poco a poco a lo largo de las orillas de los ríos y restos de meteoritos, sobre restos volcánicos y charcos. Como cualquier sistema en rápido crecimiento, las cianobacterias produjeron enormes cantidades de residuos. Si sus antepasados habían absorbido sulfuro de hidrógeno (H_2S) y habían liberado azufre (S), ellas absorbían agua (H_2O) y liberaban oxígeno gaseoso (O_2). La toxicidad del oxígeno libre es bien conocida y el oxígeno nuevo producido por las colonias fotosintéticas representaba un gran peligro inmediato para ellas, ya que se encontraban cerca del origen de este gas. Burbujas de oxígeno —veneno mortal para todos aquellos seres vivos primigenios— salían de tapetes y lodos, contaminando marismas, charcas y los lechos de los ríos.

El oxígeno es tóxico porque reacciona con la materia orgánica. Atrapa electrones y produce los llamados radicales libres, que son substancias químicas muy reactivas y de vida corta capaces de destruir los compuestos de carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno que constituyen la base de la vida. El oxígeno rompe o inutiliza los pequeños metabolitos (los nutrientes), que, de otra manera, acabarían como componentes de sistemas celulares. También se combina con enzimas, proteínas, ácidos nucleicos, vitaminas y lípidos que son esenciales para la reproducción celular. Además, reacciona rápidamente con los gases de la atmósfera, incluidos el hidrógeno, amoníaco, monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. En una palabra, el oxígeno quema: «oxida», transformando de manera espectacular, minerales del suelo como hierro, azufre, uranio y manganeso en hematita, pirita, uranita y dióxido de manganeso, que son las formas oxidadas, es decir, nuevos compuestos de aquellos metales unidos al oxígeno.

Al principio la biosfera pudo absorber la contaminación de oxígeno. Mientras hubo metales y gases en cantidad suficiente para reaccionar con él, el oxígeno no se acumuló en la atmósfera. Además, la producción de oxígeno probablemente variaba con las estaciones; más en verano, cuando la actividad fotosintética era mayor, y menos en invierno. Algunas bacterias fotosintéticas debieron de ser capaces de alternar entre la fotosíntesis productora de oxígeno y la fotosíntesis sin oxígeno, dependiendo de que hubiera cantidades suficientes de hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. (Como en la hermosa *Oscillatoria limnetica,* la producción de oxígeno fue al principio opcional. En 1975, el profesor Yehuda Cohen, de Eilat Marine Station, en Israel, descubrió la fisiología «camaleónica» de *O. limnelica,* que había aislado en las aguas cálidas de Solar Lake, en la península del Sinaí. Esta bacteria puede utilizar sulfuro de hidrógeno para la fotosíntesis cuando este compuesto es abundante, en cuyo caso la cianobacteria no desprende oxígeno. Pero cuando se ve privada de hidrógeno pasa a utilizar el del agua y el oxígeno sobrante es liberado a la atmósfera como producto residual.) La cantidad de oxígeno venenoso dependía de la época del año, de la actividad volcánica, de la población de cianobacterias y de muchas otras variables.

Como ha indicado el paleobiólogo J. William Schopf, «el registro paleobiológico muestra que el advenimiento de la fotosíntesis oxigénica fue el acontecimiento excepcional que finalmente condujo a nuestro moderno medio ambiente».[25] Aunque el registro mineral indica claramente un súbito aumento en la cantidad de oxígeno atmosférico, se está discutiendo acaloradamente sobre el momento exacto en que la fotosíntesis productora de oxígeno empezó a liberar a la atmósfera oxígeno en cantidad suficientemente importante como para producir cambios en la Tierra.

Un signo evidente de que la producción de oxígeno existía mucho antes de lo que se creía nos lo proporcionan las mismas rocas antiguas de Isua, que contenían concentraciones de grafito que señalaban los posibles restos de bacterias fotosintéticas. También se han encontrado allí algunas formaciones rocosas con hermosas bandas constituidas por tiras alternas de distintos tipos de óxidos de hierro (hematita oxidada y magnetita menos oxidada). En algunos puntos las bandas que se alternan son de un tamaño de tan sólo unas micras, en vez de metros. Aquellas formaciones de hierro en bandas conocidas como BIF (iniciales de *banded iron formations),* tienen importancia para nosotros porque representan nuestra fuente de suministro de hierro explotable. Más del 90 por ciento de la provisión mundial de hierro explotable lo constituyen menos de veinte BIFs, datados todos del Proterozoico. Para que se produjeran esas formaciones se cree que tuvieron que coincidir grandes masas de agua y cantidades de oxígeno fluctuantes. Las bacterias fotosintéticas productoras de oxígeno pueden haber abundado en la superficie de cálidas charcas volcánicas bordeando orificios y grietas en aguas ricas en hierro y sus explosiones de crecimiento estacionales, acompañados de las consecuentes ráfagas de residuos de oxígeno, habrían producido las coloreadas capas de mineral.

Es posible que las bacterias fotosintéticas también tuvieran colaboradores en la formación del hierro en bandas. Algunas bacterias que oxidan el hierro o que atascan tuberías pueden

tomar el oxígeno del medio ambiente y obtener energía, en aguas pobres en nutrientes, al combinarlo con el hierro. En la combinación de oxígeno y hierro se produce una reacción química que causa la herrumbre. Esas bacterias consiguen energía a partir de la reacción química y la herrumbre se deposita sobre sus cuerpos largos y fibrosos. En un mundo sin oxígeno estas bacterias probablemente proliferaban por encima y por debajo de las zonas de producción de dicho elemento. Año tras año pudieron haber utilizado los residuos de oxígeno en los bordes de las comunidades de cianobacterias precipitándolo en forma de herrumbre. Puede que las bacterias oxidadoras del hierro colaboraran en la formación de enormes cantidades de mineral de hierro. Y las bandas alternas de mineral de hierro pueden ser un registro de su antigua relación con las cianobacterias: la hematita se habría formado en verano, cuando las cianobacterias producían más oxígeno, generando, por lo tanto, más herrumbre mientras que las capas de magnetita se formarían probablemente en invierno, cuando la producción de oxígeno fotosintético y, por consiguiente, la oxidación del hierro eran mínimas.

Durante una parte del eón Proterozoico, desde hace 2 200 hasta hace 1 800 millones de años, hubo una enorme y súbita producción de formaciones de hierro en bandas que no ha vuelto a repetirse desde entonces. Pero, ¿qué ocurrió hace más de 3 000 años? Si la vida microbiana está realmente implicada en la producción de las bandas de hierro, esas brillantes bandas metálicas en el Labrador y en Groenlandia representan el nacimiento de comunidades bacterianas y serían la prueba más antigua de fotosíntesis bacteriana productora de oxígeno y, por consiguiente, de la vida misma.

Otro indicio espectacular de las primeras actividades aeróbicas de los seres vivos es la accesibilidad del oro, metal tan apreciado a lo largo de la historia de la humanidad, que en algún momento del eón Arqueense ascendió desde la masa fundida del centro de la Tierra. El oro incrustado en sedimentos se limita a varios conjuntos de rocas de los tiempos del eón Arqueense, y la poca cantidad que hay en todo el planeta se encuentra sorprendentemente concentrada en unos pocos lugares. El oro de las minas de Witwatersrand en Transvaal (Sudáfrica) representa el 70 por ciento de todo el que ha circulado a lo largo de la historia de la civilización. Depósitos menores se encuentran en el noroeste de Australia, en Elliot Lake (en el norte de Ontario, Canadá) y en el sur de Rusia; sin aproximarse ninguno de ellos a la producción de Transvaal.

Los mineros que extraen el oro, al descender en ascensores por pozos de varios kilómetros de profundidad hacia el interior de la Tierra, van retrociendo hacia el pasado, dejando atrás capas de cenizas volcánicas y de restos de antiguos ríos hasta alcanzar los estratos más antiguos. Para encontrar nuevos depósitos de oro siguen la veta de carbón, una capa clara de conglomerado rocoso que contiene gran cantidad de carbono orgánico. Dicha capa, atrapada entre piedra caliza y esquisto, contiene finas vetas de pirita, oro y a menudo también mineral de uranio. La veta de carbón de Witwatersrand contiene también filamentos microscópicos y estructuras esféricas que no pueden ser explicadas sólo por la mineralogía.

D.K. Hallbauer, un especialista en geología económica de Sudáfrica, fue el primero que relacionó estas estructuras con los seres vivos al interpretarlas como restos fósiles de los componentes de los líquenes. Al ser los líquenes una unión compleja entre algas y hongos, de los cuales no se conoce registro fósil hasta 2000 años después de que el oro sudafricano se depositara, nadie creyó que las partículas de Hallbauer lo fueran. Una posibilidad más convincente es que bacterias con forma de filamentos y cocos atraparan copos detríticos de oro.

Durante la actividad tectónica del Arqueense, el magma candente que venía del interior de la Tierra arrastró consigo pequeñas cantidades de oro fundido, de manera finamente dispersa en el interior de rocas de hierro, magnesio y silicato. Como el oro entra y sale de las rocas con mayor fluidez en ausencia de oxígeno que cuando este elemento está presente, habría sido erosionado fácilmente de las rocas por ríos y corrientes y arrastrado hacia el mar. Sin embargo, si el oro encuentra altas concentraciones de oxígeno y carbono orgánico, deja de estar en disolución y forma una especie de copos que precipitan.

Cualquier tipo de colonias de bacterias fotosintéticas que vivieran a lo largo de las orillas de los ríos podrían haber desempeñado un papel en este fenómeno. Al producir cantidades de oxígeno y compuestos ricos en carbono podrían haber conseguido que el oro disuelto en el agua formase copos viscosos que se habrían depositado en las orillas y en los lechos de los antiguos cursos de agua.

Actualmente ciertas bacterias *(Chromobacterium violaceum)* producen cianato, una substancia química que es utilizada por las compañías mineras en la extracción de oro a partir de sedimentos ricos en carbono. Quizá los antepasados de estos microorganismos vivieron en los ríos del Arqueense cargados de mineral y consolidaron el oro disuelto en partículas discretas. El oxígeno y el carbono de las mismas cianobacterias puede haber sido suficiente para precipitar el oro en disolución. En el sur de Africa el oro procedente del interior de la Tierra fue depositado a lo largo de un sistema fluvial que se estima en cinco veces el tamaño del Mississippi. Los grandes cursos fluviales de Witwatersrand, que hace 2500 millones de años arrastraban enormes cantidades de agua hacia el océano, acabaron secándose. Los ríos quedaron enterrados bajo kilómetros de sedimentos y sufrieron plegamientos. No fueron descubiertos hasta el siglo pasado, cuando los colonizadores afrikaners de origen holandés se sintieron atraídos por las motas de oro de algunas rocas oscuras que habían aflorado en el desierto de Transvaal. Siguieron el afloramiento hacia las profundidades y hallaron el oro siguiendo el rastro del antiguo sistema fluvial enterrado, del cual formaba parte la veta del carbono.

No obstante, la prueba más clara de la existencia de antiguas y extensas asociaciones de bacterias son los estromatolitos. Representaban en el paisaje del Proterozoico lo que los arrecifes coralinos en los mares del presente; ricos y bellos colectivos de organismos entremezclados e interdependientes. Estas rocas abovedadas, cónicas, columnares o en forma de coliflor se han encontrado a lo largo del registro fósil y aún existen en la actualidad; se componen de estratos de rocas que fueron antes tapetes microbianos. Comunidades de bacterias, especialmente cianobacterias fotosintéticas, vivieron y murieron una encima de otra. Cuando algunos estromatolitos, como los de los manantiales de aguas termales de Saratoga, en el estado de Nueva York, fueron descritos por primera vez a finales del siglo XIX por Charles Walcott y otros geólogos, se les dio el nombre de *Criptozoos,* que en griego significa «animales ocultos». Algunos de los antiguos estromatolitos tenían una altura de hasta diez metros.

En zonas muy limitadas de la Tierra puede verse que en los estratos superiores de estos estromatolitos, de unos pocos centímetros de anchura, predominan las cianobacterias. Esta es la parte viva del tapete. Todo lo que hay por debajo se compone de bacterias en estado latente, greda, arena, yeso y otros restos unidos por las matrices de los tapetes más antiguos. La capa superior presenta franjas horizontales y está constituida por bacterias fotosintéticas. Por debajo de ella se encuentran abundantes poblaciones de bacterias rojas fotosintéticas anaeróbicas, que son fijadoras de azufre. Y por debajo de éstas se desarrollan bacterias que dependen de los productos o de los restos de otros organismos. En la actualidad pueden encontrarse estromatolitos en el Golfo Pérsico, en el oeste de Australia y en las islas Bahamas. Abriéndolos y examinándolos con una lupa se puede observar una masa gelatinosa constituida por distintos tipos de bacterias; pero la verdadera precipitación de carbonato la siguen llevando a cabo las cianobacterias. En los tapetes bacterianos blandos y en los duros (que por definición son estromatolitos) las bacterias crecen en estratos multicelulares que son tan complejos y diferenciados, a su manera, como los tejidos animales.

Los estromatolitos más antiguos conocidos tienen una edad de aproximadamente 3500 millones de años, y sus estratos ricos en carbono son una prueba convincente de que las comunidades de bacterias fotosintéticas (aeróbicas o no) se desarrollaban muy bien por aquel entonces. Aunque son más bien escasos en las rocas del Arqueense, proliferaron vertiginosamente en el Proterozoico, llegando a dominar el paisaje.

Durante decenas de millones de años el exceso de oxígeno

localizadas fueron exterminadas y se originaron numerosas adaptaciones y mecanismos protectores. A partir de las cianobacterias que producían oxígeno de manera discontinua surgieron unas bacterias completamente verdes que lo producían de manera continua. Aparecieron miles de especies de fotosintetizadores aeróbicos que se adaptaron a vivir sobre rocas, en manantiales de aguas termales y formando espumas. Pero hace aproximadamente unos 2000 millones de años las substancias susceptibles de reaccionar de manera pasiva con el oxígeno ya habían sido utilizadas completamente y ese elemento empezó a acumularse rápidamente en el aire, causando una catástrofe de magnitud universal. La gente está seriamente preocupada actualmente por el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera, que oscila entre el 0,032 y el 0,033 por ciento, causado por la utilización a gran escala de combustibles fósiles. Se cree que el efecto invernadero del calor adicional retenido por el CO_2 adicional podría fundir los casquetes polares, lo que haría subir el nivel del mar e inundar las zonas urbanas de las costas actuales, causando la muerte y la destrucción en masa. Pero la contaminación industrial de nuestro eón Fanerozoico no es nada si se compara con la contaminación de los tiempos del Arqueense y del Proterozoico, que era únicamente de tipo natural. Hace unos 2000 millones de años (poco importan unos cientos de años más o menos) el oxígeno empezó a aumentar rápidamente en nuestra atmósfera. El mundo Arqueo-Proterozoico asistió a un aumento espectacular en la concentración de oxígeno atmosférico, de una parte por millón a una parte por cinco, es decir, de un 0,0001 a un 21 por ciento. Esta es, con mucho, la crisis de contaminación más importante que la Tierra haya soportado nunca.

Muchos tipos de microorganismos fueron inmediatamente aniquilados. El oxígeno y la luz forman una combinación letal, mucho más peligrosa que cuando actúan cada uno por su cuenta. Todavía hoy pueden matar instantáneamente a los organismos anaeróbicos que sobreviven en rincones sin oxígeno.

defensa contra ese cataclismo, excepto mediante la duplicación, la replicación del DNA, la transferencia genética y la mutación. La muerte a gran escala y una sexualidad bacteriana incrementada, que es característica de las bacterias expuestas a toxinas, condujeron a una reorganización del superorganismo que llamamos microcosmos.

Las nuevas bacterias resistentes se multiplicaron y reemplazaron rápidamente a las que eran sensibles al oxígeno en la superficie de la Tierra, mientras que otras bacterias sobrevivían por debajo de aquéllas en capas anaeróbicas de lodo y del suelo. A partir de un holocausto comparable al desastre nuclear que tanto tememos en la actualidad, se realizaron las revoluciones más importantes y espectaculares de la historia de los seres vivos.

Desde el principio de la exposición localizada al oxígeno, la duplicación y la transferencia genéticas originaron muchos mecanismos de protección. Los nuevos genes eran tan importantes como los manuales de supervivencia. La información contenida en ellos, tan importante para la vida en el nuevo ambiente oxigénico, se diseminó por el microcosmos, que estaba reorganizándose. La bioluminiscencia y la síntesis de vitamina E son algunas de las innovaciones que los científicos suponen que surgieron en respuesta a la amenaza del oxígeno. Pero la adaptación no se detuvo en ese punto. Las cianobacterias se apuntaron uno de los mayores éxitos de todos los tiempos al inventar un sistema metabólico que *requería* la misma substancia que había sido hasta entonces un veneno mortal.

La respiración aeróbica, que utiliza oxígeno, es una eficiente e ingeniosa manera de canalizar y explotar la reactividad de dicho elemento. Es esencialmente una combustión controlada que rompe moléculas orgánicas y produce dióxido de carbono, agua y, por añadidura, una gran cantidad de energía. Mientras que la fermentación produce normalmente dos moléculas de ATP a partir de cada molécula de azúcar fragmen-

tada, la respiración de la misma molécula de azúcar puede producir hasta treinta y seis al utilizar oxígeno. El microcosmos, seguramente forzado no hasta su punto crítico pero sí hasta un punto de intenso estrés global, hizo algo más que adaptarse; originó, por evolución, un generador accionado por oxígeno que cambió para siempre la vida y el escenario en que ésta se desarrollaba en la Tierra.

Algunas cianobacterias respiran sólo en la oscuridad, aparentemente porque utilizan la misma maquinaria molecular para las cadenas de transporte de electrones en la respiración y en la fotosíntesis. Las partes compartidas no pueden ser utilizadas simultáneamente por las dos vías metabólicas. (Las algas y los vegetales pueden respirar y realizar la función fotosintética simultáneamente porque los dos procesos se realizan en distintas partes de la célula: la fotosíntesis en los cloroplastos y la respiración en las mitocondrias. Estos dos orgánulos son indicios tentadores del destino evolutivo experimentado por estos dos tipos de microorganismos; indicios que serán considerados en el próximo capítulo.)

Las cianobacterias consiguieron llevar a cabo ambos procesos: la fotosíntesis, que genera oxígeno, y la respiración, que lo consume. Habían encontrado su lugar en el Sol. Tan sólo con unas pocas sales siempre presentes en las aguas naturales, dióxido de carbono atmosférico y la luz solar podían producir todo lo que necesitaban: ácidos nucleicos, proteínas, vitaminas y la maquinaria para fabricar estos productos. Si se considerase la capacidad de biosíntesis como una medida de la evolución, los humanos nos encontraríamos muy por detrás de las cianobacterias. Nuestras complicadas necesidades nutritivas nos hacen totalmente dependientes de las plantas y bacterias para la obtención de todas aquellas substancias que no podemos fabricar nosotros mismos. Somos, en el sentido más estricto, parásitos del microcosmos.

No es de asombrar que, con las enormes cantidades de energía a su disposición, las cianobacterias proliferaran en centenares de formas distintas, desde dimensiones muy pequeñas (la mayoría tan sólo tienen unos pocos micrómetros de diámetro) y grandes (80 micrómetros, es decir, unas ocho centésimas de milímetro). Eran simples esferas incrustadas en una matriz gelatinosa de capas de muchas células, filamentos ramificados de manera complicada que podían liberar por los extremos esporas húmedas y células que contenían cistes especiales a prueba de oxígeno, en los que se llevaba a cabo la fijación anaeróbica del nitrógeno.

Ocuparon los puntos extremos del medio ambiente, desde las aguas marinas más frías hasta los manantiales de aguas termales. Se desarrollaron nuevas relaciones de nutrición y otras bacterias empezaron a alimentarse del almidón, azúcar y metabolitos de las cianobacterias e incluso del carbono y del nitrógeno fijado que se encontraba en las células muertas. Pero lo que es más significativo es que la incesante contaminación del aire por las cianobacterias forzó a otros organismos a adquirir también la capacidad para utilizar oxígeno. Esto inició una oleada de especiación y la creación de formas y ciclos biológicos complicados.

La estabilización del oxígeno atmosférico a una concentración de aproximadamente un 21 por ciento parece ser resultado de un silencioso consenso alcanzado por la biota hace millones de años; a decir verdad, es un contrato que se sigue respetando en la actualidad. Si la concentración de oxígeno hubiese superado ese valor en algún momento, el registro fósil revelaría, sin duda, la evidencia de una conflagración a escala planetaria. El nivel actual de oxígeno en nuestra atmósfera, alto pero no en exceso, da la impresión de una sabia decisión orientada a mantener el equilibrio entre peligro y oportunidad, entre riesgo y beneficio. Incluso las selvas tropicales húmedas y las praderas son extremadamente inflamables cuando los niveles de agua son bajos. Si el tanto por ciento de oxígeno fuese sólo un poco más alto, los mismos seres vivos arderían de manera espontánea. Si el oxígeno baja, una pequeña proporción de organismos aeróbicos empieza a asfixiarse. La biosfera ha mantenido este justo medio durante cientos de millones de años como mínimo. Aunque la manera de llevar a cabo esta regulación sigue siendo un misterio, en el último capítulo de este libro veremos cómo los mecanismos que controlan la temperatura y la composición gaseosa a escala planeta-

ria pueden tener su origen en las propiedades del crecimiento normal de los organismos. La estabilización y posterior modulación de las cantidades de oxígeno en la atmósfera fue un acontecimiento tan bien recibido como terrible fue el holocausto. Se podría decir que, puesto que la vida frenó el aumento de oxígeno, debió de desarrollar un enorme conocimiento de los sistemas de ingeniería para combatir la contaminación. La apreciación alternativa es que el control cibernético de la superficie de la Tierra por organismos carentes de inteligencia pone en duda la supuesta unicidad de la consciencia humana. Aparentemente, los microorganismos no planearon controlar una crisis de contaminación de proporciones tan desalentadoras. Sin embargo, hicieron lo que ningún gobierno ni entidad pública podría hacer actualmente. Al crecer, experimentar mutaciones e intercambiar genes, producir oxígeno unas bacterias y consumirlo otras, mantuvieron el equilibrio de ese elemento en todo el planeta.

Aunque no constituye más que una quinta parte de nuestra atmósfera, desde el punto de vista químico el oxígeno atmosférico es muy abundante: debería reaccionar con otras substancias químicas para formar compuestos estables tales como dióxido de carbono y sales de nitrógeno. Como James Lovelock indica: «El nivel actual de presión de oxígeno es a la biosfera de nuestra época lo que el suministro de electricidad de alta tensión al estilo de vida del siglo XX. Se podría pasar sin ella, pero las potencialidades quedarían substancialmente reducidas. La comparación es bastante ajustada ya que, desde el punto de vista químico, resulta muy práctico expresar el poder oxidativo de un medio ambiente en términos de su potencial de oxidación-reducción (redox), medido eléctricamente y expresado en voltios».[26]

En cuanto las cantidades de oxígeno atmosférico empezaron a ser significativas, comenzó a formarse una capa protectora de ozono, que tuvo su origen en la estratosfera, flotando por encima del resto del aire. Aquella capa de moléculas de tres átomos de oxígeno puso el punto final a la síntesis abiótica de compuestos orgánicos al detener el paso a los rayos ultravioleta de alta energía.

La producción de nutrientes y oxígeno a partir de la luz iban a convertir a los microorganismos en la base de un ciclo de alimentación global que alcanza hasta nuestra especie en la actualidad; los animales no habrían podido nunca evolucionar sin los nutrientes producidos por fotosíntesis y sin el oxígeno del aire. El generador de energía creado por la contaminación producida por las cianobacterias fue un requisito previo para una nueva unidad de vida, la célula con núcleo, que es el componente fundamental de los vegetales, animales, protistas y hongos. En los eucariontes, los genes se encuentran incluidos en un núcleo y hay una elaborada orquestación de procesos celulares internos, incluyendo la presencia, en la zona que rodea al núcleo (citoplasma), de mitocondrias —estructuras especiales que metabolizan oxígeno para el resto de la célula—. Tan distinta es la organización de la célula eucariótica frente a la de la célula procariótica o bacteriana, que los dos tipos representan la mayor separación conocida entre formas de vida. Quizá su origen en el centro de las presiones selectivas extremas de la catástrofe de oxígeno fue la causa de que las células eucarióticas fuesen tan diferentes. Pero la diferencia entre células bacterianas no nucleadas y células con núcleo es mucho mayor que la que se da entre vegetales y animales.

Antes de que las cianobacterias rompieran las moléculas de agua y produjeran oxígeno, nada hacía pensar que la pátina de vida sobre la Tierra pudiese llegar a ser algo más que una capa de verdín apenas visible en la superficie del planeta. El desarrollo y expansión de la vida formando jardines, bosques y ciudades atestigua la capacidad que tienen los tapetes microbianos y los limos de las orillas del mar para alterarse mutuamente en sus hábitats locales. Pero los microorganismos causaron un impacto aún mayor: alteraron toda la superficie de la Tierra. La biosfera, estimulada por la convulsión y el peligro del oxígeno libre, pudo finalmente superar la crisis. Pero la Tierra ya no era igual que antes; se había convertido en una anomalía planetaria.

Hacia mediados del Proterozoico, hace unos 1500 millones de años, la evolución bioquímica casi había terminado. La moderna superficie de la Tierra y la atmósfera habían quedado fi-

jadas en gran parte como las conocemos en la actualidad. La vida microbiana permitía que el aire, el suelo y el agua reciclaran gases y otros elementos a través de los fluidos de la Tierra como lo hacen en la actualidad. Con excepción de unos pocos compuestos exóticos, como los aceites esenciales y alucinógenos de las fanerógamas y los venenos de las serpientes, tan exquisitamente efectivos, los microorganismos procarióticos pueden montar y desmontar todas las moléculas de la vida moderna.

A juzgar por la perspectiva que nos dan los logros conseguidos a escala planetaria por los primitivos seres vivos, no es sorprendente que el desarrollo del repertorio bioquímico de la vida necesitase más de dos mil millones de años. La etapa microbiana duró casi el doble que el resto de la evolución hasta la actualidad. Se puede aplicar al microcosmos la frase que se ha atribuido a Abraham Lincoln: «Si tuviera ocho horas para cortar un árbol, me pasaría seis afilando el hacha». Preparó el terreno para la evolución respectiva de hongos, animales y vegetales, grupos que surgieron en una sucesión relativamente rápida. Igual que en psicología, que considera los años de la infancia de crucial importancia para el desarrollo de la personalidad adulta, los primeros eones de la vida definieron el contorno de la vida moderna. La era de las bacterias transformó la Tierra, convirtiendo un terreno de aspecto lunar poblado de cráteres en el fértil planeta en que vivimos. Aquel extraño mundo primitivo que carecía de atmósfera de oxígeno iba a desaparecer. A diferencia de los vecinos planetas Marte y Venus, cuyas atmósferas, una vez establecidas, se convirtieron en mezclas químicas estables de dióxido de carbono, la Tierra proseguía su actividad. Libre ya de la mano del tiempo, quedó atrapada en los procesos de la vida, creativos y autopoyéticos.

7
Células nuevas



Con la invención de la respiración aeróbica, basada en la utilización del oxígeno, los procariontes dieron con una fuente de energía que sobrepasaba su máxima capacidad de explotación. Desconocedoras de la energía global que generaban, las bacterias aeróbicas prosperaron en sus nichos locales esparcidos por todo el globo durante centenares de millones de años. Pero cuando el nivel del oxígeno atmosférico iba creciendo para llegar a alcanzar el 21 por ciento, cuando su proporción en la atmósfera aún era baja (hace unos 2200 millones de años), se formó un nuevo tipo de célula. Era la célula eucariótica, con una estructura clave, el núcleo, y una importante característica secundaria, las partes de la célula conocidas como mitocondrias. Cuando los eucariontes viven como células individuales se llaman protistas. Sus fósiles son conocidos con el nombre de acritarcos. Como indica Chet Raymo, astrónomo del Stonehill College, la diferencia entre las células nuevas y los viejos procariontes en el registro fósil es tan grande como si la *Kitty Hawk* (la máquina voladora de los hermanos Wright) hubiese precedido al Concorde tan sólo en una semana.[27]

La transición biológica entre bacterias y células con núcleo, es decir, entre procariontes y eucariontes, es tan repentina que no puede ser explicada en modo alguno por cambios graduales en el tiempo. La división entre bacterias y aquellas

células nuevas es realmente la más espectacular que se da en toda la biología. Vegetales, animales, hongos y protistas están basados en el diseño nuclear de la célula, distinción que refleja la herencia común de estos organismos. Juntos, estos grupos forman el superreino de los eucariontes, que difiere radicalmente del mundo bacteriano o superreino de los procariontes (reino *Monera*).

Las nuevas células, que no eran simplemente bacterias más avanzadas, eran mayores y más complejas. Presentaban canales tortuosos de membranas internas, incluyendo la que envolvía el núcleo. En su citoplasma flotaban orgánulos primorosamente empaquetados que utilizaban oxígeno y eran capaces de reproducirse. Las primeras células nuevas aparecen en el registro fósil como los primeros acritarcos de hace entre 1600 y 1400 millones de años. Aquellos microfósiles esféricos sin apenas forma característica y con gruesas paredes se cree que son los cistos resistentes de algún tipo de alga primigenia. Los acritarcos más recientes, con una antigüedad inferior a 1000 millones de años, son aún mayores y poseen unas curiosas cubiertas exteriores con relieves. Han sido encontrados en rocas de Escandinavia y en el registro proterozoico del Gran Cañón, en Arizona, así como en muchos otros lugares.

Si los acritarcos son realmente los restos de los eucariontes más antiguos, aquéllos tenían núcleos separados del resto de la célula por una membrana. En algunas microfotografías de cortes de rocas del Proterozoico tomadas de todas partes del planeta destacan claramente grandes células. Los primeros eucariontes probablemente tenían cromosomas en el interior de sus células con núcleo. El DNA de los cromosomas se halla íntimamente empaquetado con proteínas, normalmente en una proporción de un 40 por ciento de DNA y un 60 por ciento de proteína. Además de toda esta proteína, las células con núcleo tienen hasta 1000 veces más DNA que las células bacterianas. La función de tan enormes cantidades de DNA es una de las mayores incógnitas de la biología molecular. Mientras una parte del DNA es, naturalmente, útil, otra gran parte es lo que se llama «DNA redundante», es decir, copias de genes repetidas en cualquier parte de los cromosomas.

Algunos de los eucariontes unicelulares o protistas, como las algas que dejaron cistos acritarcos, también poseían, suspendidos en su citoplasma, paquetes portadores de clorofila capaces de realizar la fotosíntesis. Estos componentes celulares fotosintéticos, llamados plástidos, coexistían en las algas o células planctónicas con los componentes utilizadores de oxígeno, las mitocondrias. Igual que las mitocondrias, los plástidos podían autorreproducirse por división directa, a pesar de estar formando parte de una célula protista mayor. Es muy posible, como veremos algo más adelante, que los plástidos y mitocrondrias representen bacterias que quedaron atrapadas dentro de otras bacterias. La súbita y generalizada aparición de acritarcos en el registro fósil da fe del gran éxito de las nuevas células, que eran probablemente comunidades entrelazadas de células dentro de otras células, surgidas hace unos 1400 millones de años. Adoptando la forma del primer plancton marino de este mundo, las nuevas células flotaban y se reproducían en la superficie de los antiguos mares. Algunas de ellas murieron y quedaron sepultadas bajo las extrañas formas esféricas y poligonales de los fósiles acritarcos.

Las nuevas células parecen haber sido confederaciones bacterianas. Cooperaron entre ellas y centralizaron las funciones formando un nuevo tipo de gobierno celular. Aquellos advenedizos tenían una organización cada vez más centralizada y sus diversos orgánulos celulares acabaron integrados en una nueva unidad biológica. Por ejemplo, en los modernos eucariontes el citoplasma se va desplazando en el interior de la célula como si lo hiciera con un determinado propósito. Este movimiento intracelular dirigido no se ha visto nunca en bacterias. Pero, de manera más clara, en vez del replicón único bacteriano, el DNA de los eucariontes se encuentra en los cromosomas, estructuras arrosariadas ligadas por proteínas, con cantidades masivas de DNA. Han surgido muchas ideas para explicar las enormes cantidades de DNA en las células nucleadas. W.H.F. Doolitle y Carmen Sapienza, biólogos moleculares, afirman que se trata de DNA «egoísta», que se encuentra allí porque la replicación es su estilo de vida y ha podido duplicarse y persistir en el ambiente acomodaticio del interior de

la célula eucariótica.[28] Si así fuese, el DNA redundante no necesitaría desempeñar ninguna función biológica. Otros científicos creen que el DNA extra proporciona una «reserva» de información genética que podría ser utilizada por futuras generaciones, como el dinero guardado en un banco. Otros han propuesto incluso una suerte de predestinación celular: la evolución futura, dicen, se encuentra ya codificada en el DNA y puede ser útil con el paso del tiempo.

No creemos que sea probable que la evolución esté programada con anticipación de esta manera. Creemos que el DNA repetitivo proviene originalmente de distintas bacterias (anaeróbicas, utilizadoras de oxígeno y otras) que se unieron en la comunidad que luego se convirtió en la célula eucariótica. Sin duda, el DNA extra se generó por la tendencia de dicha molécula a la replicación, pero empezó a partir del DNA de los miembros replicantes originales de la fusión. Las copias extra del DNA se conservaron no debido a «egoísmo», sino porque empezaron a utilizarse para resolver los problemas del empaquetado y funcionamiento de esos prodigios en miniatura que son los cromosomas. Después de todo, el DNA del núcleo de todas las células de nuestro cuerpo, si se dispusiera alineado en vez de envuelto y empaquetado de manera apretada en forma de cromosomas, se extendería de la Tierra a la Luna, ida y vuelta, no una sola vez, sino... ¡más de un millón de veces![29]

Cualquier tipo de célula o tiene núcleo o carece de él; no se da un término medio. La brusquedad de su aparición en el registro fósil, la total discontinuidad entre formas vivas con y sin núcleo y la enigmática complejidad de los orgánulos internos capaces de autorreproducirse hacen pensar que las nuevas células se formaron por un proceso fundamentalmente distinto de la mutación simple o de la transferencia genética bacteriana. El trabajo científico de la pasada década nos ha convencido de que este proceso fue la simbiosis. Procariontes independientes penetraron en el interior de otros para digerir los desechos de la célula que los albergaba; sus productos de desecho eran utilizados, a su vez, como alimento por la célula huésped. Como resultado de esta íntima participación conjunta

se establecieron relaciones permanentes: las células de las siguientes generaciones eran células adaptadas a la vida en el interior de otras células. Con el tiempo, estas poblaciones de bacterias que habían evolucionado conjuntamente se convirtieron en comunidades de microorganismos con una interdependencia tan arraigada que llegaron a ser, a efectos prácticos, organismos individuales estables (protistas). La vida había dado otro paso más hacia adelante, hacia el sinergismo de la simbiosis, dejando atrás el entramado de la libre transferencia genética. Se mezclaron organismos separados, creando nuevas unidades que eran superiores a la suma de sus componentes.

Esta teoría que explica el origen de las células con núcleo a partir de una simbiosis no es, en modo alguno, de mero cuño. Al igual que el geólogo suizo Alfred Wegener, que propuso por primera vez la noción de deriva continental al contemplar las formas de los continentes que parecían ajustar unas con otras como en un rompecabezas, los biólogos de finales del siglo pasado, utilizando el recién inventado microscopio compuesto, observaron inclusiones de aspecto bacteriano en células vegetales y animales y creyeron que podían ser, o podían haber sido en el pasado, bacterias. Ya en 1893 el biólogo alemán A. Schimper propuso la idea de que las partes fotosintéticas de las células vegetales podían proceder de cianobacterias (o algas azules, como se las llamaba en aquel tiempo). Durante la primera cuarta parte del presente siglo, el anatomista estadounidense Ivan Wallin y el biólogo y estudioso ruso Konstantin S. Mereschovsky llegaron, independientemente, a la misma conclusión. En 1910 Mereschovsky, que era profesor en la Universidad de Kazan, publicó una visión esencialmente moderna sobre el origen de las células eucarióticas a partir de varios tipos de bacterias. Al mundo de la biología le ha costado más de setenta años ponerse a su nivel.

Pero el desarrollo de la genética moderna destacó la importancia del núcleo de la célula eucariótica, y en el siglo XX ha sido normal rechazar las teorías de la simbiosis entre células, tachándolas de ridículas o absurdas. Tanto es así que el profesor Richard Klein, de la Universidad de Vermont, llegó a decir, hace tan sólo unos veinticinco años, que «esta falsa mo-

neda [se refería a la teoría del origen simbiótico de plástidos y mitocondrias] ha estado en circulación durante mucho tiempo... Desde luego, no existe base química, estructural o filogenética que pueda sustentar esta creencia».[30] Y hace tan sólo veinte años, a los estudiantes universitarios aún se les enseñaba que los orgánulos existentes en el interior de las células eucarióticas probablemente se habían separado del núcleo y habían desarrollado posteriormente sus funciones específicas independientes. Sin embargo, cuando fue posible analizar el DNA, pronto se vio que esta suposición presentaba una debilidad importante: no podía explicar la presencia de DNA en ciertos orgánulos, ni por qué este DNA era parecido al de los genóforos bacterianos y distinto del de los cromosomas del núcleo. En 1962, Hans Ris, biólogo celular de la Universidad de Wisconsin, descubrió unas estructuras con el mismo tipo de DNA en los cloroplastos de *Chlamydomonas*. Enseguida quedó impresionado por la semejanza entre el aspecto del DNA de los cloroplastos y el de las cianobacterias. Desde entonces las «pruebas químicas estructurales y filogenéticas» fueron confirmando cada vez más la idea que explica el origen de algunos componentes de las células nucleadas a partir de bacterias de vida libre.

La religión y la mitología han abundado siempre en descripciones fantásticas de criaturas que combinan distintas partes animales para crear seres imaginarios, como sirenas, esfinges, centauros, diablos, vampiros, hombres lobo y ángeles. Pero la realidad puede llegar a superar la ficción y la biología ha refinado la atractiva idea que se tenía por intuición al descubrir la abrumadora probabilidad estadística de la existencia real de seres combinados. Nosotros, y todos los seres formados por células con núcleo, puede que seamos seres compuestos, resultado de la unión de distintas criaturas. Las células del cerebro humano que concibieron esas criaturas son a su vez quimeras, ni más ni menos que fantásticos productos de la unión de varios tipos de procariontes que habían sido independientes y que evolucionaron luego conjuntamente.

Nadie ha tenido una vida lo suficientemente larga como para poder ser testigo del origen de las especies en el medio natural. Pero en una ocasión un microorganismo evolucionó tan rápidamente en condiciones de laboratorio que pudo seguirse dicha evolución. Kwang Jeon, un científico brillante y gran observador del Departamento de Zoología de la Universidad de Tennessee (Estados Unidos), tuvo la suerte de ser testigo de este caso ilustrativo que luego describió.[31] La odisea simbiótica registrada por Jeon muestra la dinámica que creemos fue responsable del rápido desarrollo de las células con núcleo a partir de bacterias carentes de él hace aproximadamente 1500 millones de años. La historia demuestra claramente lo inevitable de algún tipo de cooperación entre organismos que han de vivir juntos y sobrevivir y muestra la tenue división entre competición y cooperación evolutivas. En el microcosmos, huéspedes y prisioneros pueden ser una misma cosa y los más temibles enemigos pueden llegar a ser indispensables para la supervivencia.

Jeon había estado cultivando amebas y experimentando con ellas durante años cuando recibió un nuevo lote en su laboratorio. Después de colocar este grupo nuevo en unas cápsulas especiales junto a otras amebas procedentes de todas partes del mundo, observó la propagación de una grave enfermedad entre aquellos microorganismos. Las amebas sanas iban tomando un aspecto redondeado y granulado. Dejaban de comer y eran incapaces de dividirse. Cápsula tras cápsula, cada vez iban muriendo más amebas. Las pocas que crecían y llegaban a dividirse lo hacían como de mala gana, aproximadamente una vez al mes en vez de cada dos días.

Cuando Jeon examinó al microscopio las amebas muertas y las moribundas observó la presencia de pequeñas manchas en el interior de las células. Con una inspección más detallada vio que en el interior de cada ameba había aproximadamente 100 000 bacterias en forma de bacilo, que habían llegado con los nuevos individuos y habían infectado el resto de su colección. Sin embargo, la enfermedad no llegó a ser una catástrofe total. Una pequeña minoría de amebas infectadas sobrevivió a la plaga. Estas amebas «bacterizadas» eran organismos delica-

dos y frágiles, con una sensibilidad extraordinaria al calor, al frío y a la falta de nutrientes. Los antibióticos que, aunque son mortales para las bacterias, no perjudicaban a sus amebas normales «no bacterizadas», ahora acababan con ellas fácilmente. Se estaba produciendo un cambio: los dos tipos de organismos, bacterias y amebas, se estaban convirtiendo en uno.

Durante unos cinco años Jeon estuvo tratando las amebas infectadas para conseguir que recuperaran su estado sano original. Para ello seleccionaba las más resistentes y dejaba morir a las otras. Aún infectadas, las amebas empezaron a reproducirse de nuevo al ritmo normal de una división cada dos días. Hablando en términos de reproducción, estaban tan adaptadas como sus antepasados sanos. No se habían deshecho de sus bacterias, todas albergaban «gérmenes» en su interior, pero estaban curadas de su enfermedad. Había unas 40 000 bacterias en el interior de cada una de las amebas recuperadas.

Por su parte, las bacterias habían regulado de manera espectacular sus tendencias destructivas para poder vivir en el interior de otras células vivas. Por tanto, a partir de una confrontación violenta surgió un nuevo organismo simbiótico: las amebas bacterizadas. Ahora, transcurridos más de diez años desde aquella peste, las amebas, infectadas de manera permanente, ya no están enfermas y viven perfectamente en Knoxville (Tennessee).

Pero la historia no acaba aquí. Aplicando su experiencia en la manipulación de los núcleos de las amebas, Jeon continuó sus experimentos originales. Se puso en contacto con amigos a los que había enviado amebas sanas antes de que se produjera la epidemia y les pidió que le devolvieran algunas de estas amebas que no habían estado nunca expuestas a las bacterias patógenas. Con una aguja curvada de cristal extrajo el núcleo de amebas infectadas y no infectadas y los intercambió.

Las amebas infectadas vivieron indefinidamente con los nuevos núcleos. Pero las amebas «limpias» a las que se había proporcionado núcleos de las células que habían estado infectadas durante años estuvieron luchando durante unos cuatro días y después murieron. Parecía como si los núcleos fueran

incapaces de mantener una célula «sana». ¿Se había llegado a un punto en que necesitaban la infección bacteriana?

Para averiguarlo, Jeon preparó otro lote de amebas y organizó una misión de salvamento. Cuando calculó que a las bacterias sin amebas y con los núcleos nuevos les debía de quedar más o menos un día de vida, inyectó unas pocas bacterias a algunas de ellas. El número de bacterias aumentó rápidamente hasta un nivel de unas 40 000 por célula, y las amebas enfermas recuperaron la salud. Se había establecido una condición de simbiosis; las bacterias eran el remedio que necesitaban.

Las amebas de Jeon morían por la acción de la penicilina, que se adhería a la pared celular de las bacterias que aquellas tenían en su interior y destruían la población interdependiente que es la célula. El pacto entre las bacterias y las amebas ha llegado a ser tan íntimo y fuerte que la muerte de uno de los miembros de la alianza significa la muerte de ambos.

Las amebas de Jeon mostraron que las únicas diferencias entre organismos que matan o causan enfermedades, organismos que viven juntos y los que son componentes indispensables de los organismos son diferencias de gradación. Organismos patógenos peligrosos pueden llegar a ser orgánulos necesarios en menos de diez años, tiempo muy corto si lo comparamos con las aproximadamente 350 millones de décadas de evolución biológica. La simbiosis conduce a la aparición de nuevas especies de manera brusca. Estas nuevas especies, como las amebas bacterizadas, no se formaron por evolución gradual al acumular mutaciones por un largo período de tiempo.

Los experimentos llevados a cabo con las amebas destacan la equivocación de creer que la evolución trabaja siempre «por el bien del individuo». Cabe preguntarse qué es el «individuo» después de todo. ¿Es la ameba «sola» con la bacteria en su interior o es la bacteria «sola» viviendo en el ambiente celular que es, a su vez, un medio vivo? En realidad, el individuo es algo abstracto, una categoría, un concepto. Y en la naturaleza tiende a evolucionar aquello que se encuentra más allá de cualquier categoría o concepto limitados.

Uno de estos conceptos es la idea muy extendida de que la evolución es una lucha sangrienta en la que sólo sobrevive el más fuerte. «La supervivencia del más apto», lema ideado por el filósofo Herbert Spencer (1820-1903), fue adoptado por los empresarios de finales del siglo XIX para justificar prácticas tan mezquinas como la utilización de mano de obra infantil, sueldos ínfimos y brutales condiciones de trabajo. Deformado hasta significar que aquellos que tienen menos escrúpulos son los vencedores en la «lucha por la existencia», implicaba también que la explotación, al ser algo natural, era moralmente aceptable.

Darwin se habría sorprendido al ver el mal uso que se hacía de sus ideas. El utilizó la frase de Spencer «supervivencia del más apto» refiriéndose no a fuertes músculos, hábitos depredadores o al látigo del patrono, sino al hecho de dejar más descendencia. El mejor, en lenguaje evolutivo, significa el más fecundo. No importa tanto el castigo de la muerte, que es inevitable, como la propagación de la vida, que podría no darse.

Se ha hablado mucho más de la competencia, en la que el fuerte es el que vence, que de la cooperación. Pero determinados organismos aparentemente débiles a la larga han sobrevivido al formar parte de colectivos, mientras que los llamados fuertes, que no han aprendido nunca el truco de la cooperación, han ido a parar al montón de desechos de la extinción evolutiva.

Si la simbiosis es tan frecuente e importante en la historia de la vida como parece, habrá que reconsiderar la biología desde el principio. La vida en la Tierra no es de ninguna manera un juego en el cual algunos organismos ganan y otros pierden. Es lo que en el campo matemático de la teoría del juego se conoce como un juego «de suma *no* cero». Un juego de suma cero es aquel en que uno de los participantes gana a expensas del otro, como ocurre en el ping-pong o en el ajedrez. Un ejemplo de juego de suma *no* cero es cuando los niños juegan a guerras o a policías y ladrones: puede ganar más de un jugador y también puede perder más de una parte. Realmente, la vida es un juego de suma *no* cero; bastante más de lo que muchos creen. Robert Axelrod, especialista en ciencia política, reunió hace algún tiempo un grupo de teóricos del juego profesional, economistas, biólogos evolucionistas y matemáticos de todo el mundo.[32] Los participantes en la convención presentaron programas de ordenador para participar en *El dilema del prisionero,* un juego de suma *no* cero en el cual los dos jugadores que participan obtienen tres puntos si cooperan entre ellos y un punto si los dos abandonan. Si un jugador abandona después de que el otro haya colaborado obtiene cinco puntos, mientras que el que colabora no recibe ninguno. A primera vista parece, por tanto, que la mejor manera de obtener puntos es abandonar, mientras se engaña al contrario para que colabore. Pero esto resulta difícil de hacer. Axelrod se dio cuenta de que las estrategias más efectivas eran las actitudes «amables», «indulgentes» y «recíprocas». «Amable» significaba no ser el primero en dejar de colaborar, «indulgente» significaba no proseguir la no-colaboración en las siguientes tiradas para «dar al otro jugador una lección» —en el caso de que dejara de colaborar en una ocasión pero luego cambiara su actitud— y «recíproca» significaba colaborar (y dejando de colaborar) una vez como mínimo si el contrincante lo hacía. Algunos programas egoístas y prepotentes, que trataban de aprovecharse dejando de colaborar con los que cooperaban, resultaron ser los peores. Entonces Axelrod emprendió la tarea de hacer evolucionar los programas de ordenador haciendo que los jugadores con mejores resultados estuvieran más representados en futuras generaciones. Después de un número de generaciones suficiente, apenas persistía ninguno de los programas que actuaban de manera implacable. Axelrod llegó, pues, a la conclusión de que, en un juego de suma no cero, la cooperación aumenta a medida que transcurre el tiempo. El trabajo de Axelrod es consecuente con nuestra opinión de que todos los grandes organismos se han originado a partir de procariontes más pequeños que consiguieron juntos una victoria para la cooperación en favor del arte de la convivencia.

No es ninguna extravagancia decir que, si nos sentimos fuera de lugar, llenos de dudas, desencajados, o como si nos desmoronásemos, es probablemente porque nos encontramos de

verdad en esas condiciones. Los organismos reales son como ciudades. Los Angeles y París pueden ser identificadas por sus nombres, por sus límites geográficos y por la manera de vivir, en general, de sus habitantes. Pero una inspección más a fondo revela que la ciudad está formada por inmigrantes de todas partes, por vecindarios, por delincuentes y filántropos, gatos vagabundos y palomas.

Como las ciudades, los organismos individuales no son formas platónicas con fronteras bien definidas. Son seres acumulativos con subsecciones autosuficientes y tendencias poco definidas. Y de la misma manera que son compuestos de especies, también son los elementos funcionales de superorganismos superiores, el mayor de los cuales es la pátina planetaria. Un orgánulo en el interior de una ameba, en el tracto intestinal de un mamífero que vive en un bosque de este planeta, se encuentra inmerso en un mundo que está comprendido en muchos otros mundos. Cada uno de ellos proporciona su propio punto de referencia y su propia realidad.

Nuestras propias células, como las amebas de Jeon, necesitan seguramente de antiguas bacterias intrusas para vivir y respirar. Nuestros antepasados dejaron sus huellas genéticas en las células que forman nuestro cuerpo. La historia de la primitiva fase puramente procariótica se conserva de manera especial en tres tipos de estructuras intracelulares: las mitocondrias, los plástidos (cloroplastos) y los undulipodios. Sin ellos no existirían nuestro mundo interior, el mundo que nos rodea ni la insignificante interfase entre estos dos mundos que conocemos como vida humana.

8
Conviviendo



Con toda su complejidad —sobre todo si se la compara con una gotita inanimada de substancias químicas—, la célula procariótica es una entidad muy sencilla entre las formas de vida; una membrana que rodea algo de citoplasma salpicado por centenares de ribosomas; por el centro, flotando, un cordón libre de DNA casi puro que almacena unos 4000 genes. La célula con núcleo, por el contrario, es mayor, más compleja, está sembrada de mitocondrias y plástidos y se mantiene unida por una estructura reticular y por el citoplasma que se mueve circulando alrededor de todas estas estructuras. El DNA del núcleo, en gran parte repetitivo, se encuentra enrollado de manera apretada en los cromosomas que están contenidos en un núcleo limitado por una membrana. Con la capacidad de juzgar y comprender un hecho que nos da la visión posterior del mismo, las células eucarióticas ahora parecen el producto de la fusión de distintos organismos. Igual que en las empresas constituidas por seres vivos, algunas de estas fusiones empezaron como una tentativa hostil de un organismo para dominar a otro. Pero a lo largo de centenares de millones de años llegaron a estar tan bien armonizadas, tan entrelazadas, que fueron necesarios el microscopio electrónico y el análisis bioquímico para acabar con la ilusión de que la armonía existente entre las distintas partes celulares se había dado siempre.

El primer componente de la empresa celular que propor-

cionó pistas sobre su origen fue la mitocondria. Ya en 1918, el tamaño reducido y la manera sencilla de dividirse de estos orgánulos convencieron a Paul Portier, biólogo francés, de que eran descendientes directos de bacterias alojadas en el interior de células animales y vegetales. Ivan Wallin llegó a la misma conclusión en 1925.

Presentes en casi todas las células con núcleo, estos oscuros cuerpos limitados por una membrana proporcionaban a la célula que los rodeaba abundante energía proveniente del oxígeno del aire. Debido a la presencia de las mitocondrias, todos los seres vivos de la Tierra formados por células con núcleo (lo que, naturalmente, nos incluye a nosotros y a todos los organismos con excepción de las bacterias) tienen metabolismos extraordinariamente semejantes. Dejando de lado el metabolismo fotosintético monopolizado por plantas y algas (que es prácticamente idéntico al de las cianobacterias), el metabolismo eucariótico es el mismo en sus detalles fundamentales. Las bacterias, por el contrario, presentan una gama mucho más amplia de variaciones metabólicas que los eucariontes. Se permiten extrañas fermentaciones, producen gas metano, «comen» nitrógeno en forma gaseosa directamente del aire, producen energía a partir de glomérulos de azufre, precipitan hierro y manganeso al respirar, queman hidrógeno utilizando oxígeno para producir agua, crecen en agua en ebullición y en salmuera, almacenan energía utilizando el pigmento rojo rodopsina, y así sucesivamente. Como grupo, las bacterias obtienen su alimento y energía con métodos muy ingeniosos, utilizando todo tipo de fibra vegetal y residuos animales como producto inicial. (Si así no fuese, viviríamos sobre un montón cada vez mayor de basura.) Nosotros, en cambio, utilizamos sólo uno de sus muchos diseños metabólicos para la producción de energía, a saber, el de la respiración aeróbica, la especialidad de las mitocondrias.

En las células eucarióticas los restos de moléculas nutritivas fermentadas en el citoplasma, tales como alcoholes y ácido láctico, entran en la mitocondria y pasan por un ciclo de reacciones que implican la intervención de oxígeno y el mismo tipo de cadenas de electrones que se encuentran en las

bacterias aeróbicas. Estas reacciones en el interior de las mitocondrias producen la mayor parte del ATP necesario para la mitocondria y para el resto de la célula. La oxidación de las moléculas nutritivas origina dióxido de carbono y agua como producto residual.

Las mitocondrias han mantenido muchos signos misteriosos de su anterior condición de organismos libres. Aunque se encuentran en el exterior del núcleo de la célula, poseen su propio aparato genético, incluyendo su propio DNA, RNA mensajero, RNA de transferencia y ribosomas encerrados en las membranas mitocondriales. Como el DNA bacteriano, el suyo no está compactado en forma de cromosomas y, a diferencia del cromosoma que se encuentra en el núcleo de la célula en que vive, no está recubierto por ninguna capa de histona (un tipo de proteína). Las mitocondrias ensamblan proteínas en ribosomas que son muy semejantes a los ribosomas de las bacterias. Además, los ribosomas de las mitocondrias y los de las bacterias respiradoras suelen ser sensibles exactamente a los mismos antibióticos, como la estreptomicina.

Como la mayor parte de bacterias, y a diferencia de la complicada reproducción del resto de células nucleadas, las mitocondrias se dividen en dos para reproducirse, normalmente en momentos distintos cada una e independientemente de la reproducción del resto de la célula. Estudios llevados a cabo en el Laboratorio Carlsberg de Copenhagen y en el Laboratorio del Centro Nacional Francés de Investigación Científica (Centre National pour la Recherche Scientifique, CNRS) de Gif-sur-Ivette demostraron que las mitocondrias realizan la transferencia genética no sistemática que caracteriza el sexo bacteriano.

Estos y otros indicios sugieren la explicación de que las mitocondrias fueron en un tiempo pasado bacterias que acabaron ocultándose de manera simbiótica en el interior de células bacterianas mayores. En los suelos húmedos del Proterozoico o en un tapete microbiano con bacterias verdes o cianobacterias en el que burbujeaban increíbles cantidades de oxígeno contaminante por toda su superficie, forzando a todos los seres vivos a su alrededor a escapar o a adaptarse, surgió un

tipo de bacteria que podía respirar oxígeno. Debió de ser un feroz depredador, quizá de aspecto parecido a las bacterias depredadoras modernas como *Bdellovibrio* o *Daptobacter.*

Las bacterias del género *Bdellovibrio* son respiradoras de oxígeno que destrozan sus presas bacterianas comiéndoselas desde el interior. Su nombre, derivado del griego, describe su perverso método de actuar: *bdello* significa sanguijuela y *vibrio* se refiere a su forma de coma vibrátil. *Bdellovibrio* ataca sujetándose a la presa y girando como un taladro para penetrar en el interior de su víctima y acabar con su material genético. Después de haberla utilizado para fabricar sus propios genes y proteínas, rompe la bolsa celular de su desgraciado hospedador, que ya está vacía y carece de utilidad.

Daptobacter, otro depredador bacteriano, también ataca a otras bacterias de manera cruel. En 1983, Isabel Esteve, de la Universidad Autónoma de Barcelona, descubrió que, contrariamente a *Bdellovibrio, Daptobacter* (la bacteria «roedora») atravesaba las membranas interior y exterior de la pared celular de su víctima. Luego se dividía hábilmente, una y otra vez, en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Imaginemos el antepasado de nuestras mitocondrias: un asaltante sin escrúpulos, capaz de respirar oxígeno, si este elemento se encuentra a su alrededor, o pasando sin él si es necesario. Los antepasados de las mitocondrias invadían otras bacterias antepasadas nuestras y se reproducían en su interior. Al principio los huéspedes invadidos apenas podían mantenerse vivos. Pero cuando morían, los invasores desaparecían con ellos. Al final sólo quedaron los que habían cooperado. Las víctimas invadidas y las mitocondrias domadas se recuperaron del cruel ataque y desde entonces, hace ya 1000 millones de años, han vivido en una unión dinámica.

A la larga, los depredadores más crueles, tales como los microorganismos causantes de terribles enfermedades, originan su propia ruina al matar a sus víctimas. La depredación moderada (el ataque que no mata o que lo hace de manera lenta) es un tema que se repite en la evolución. Los precursores depredadores de las mitocondrias invadían a sus huéspedes y los explotaban, pero la presa resistía. Obligados a contentarse con

una parte prescindible de la presa (sus productos de desecho) en vez de con todo su cuerpo, algunos precursores de las mitocondrias se multiplicaban pero no mataban nunca a sus proveedores de nutrientes. Con el tiempo se produjeron cambios por ambas partes. La hostilidad se convirtió en intercambio, Philip John, de la Universidad de Reading, cree que algunos tipos de cáncer representan un tipo de vuelta atávica al estado original de hostilidad procariótica. A partir del comportamiento característico de las mitocondrias en muchos tejidos cancerosos, John ha llegado a la conclusión de que las rebeliones de las mitocondrias no han sido dominadas permanentemente en todos los casos.

Finalmente, algunas de las presas desarrollaron una tolerancia a sus depredadores aeróbicos, que entonces permanecieron vivos y en perfectas condiciones en el interior rico de nutrientes del hospedador. Los dos tipos de organismos utilizaban los productos del metabolismo del contrario. Al conseguir reproducirse en el interior de las células invadidas sin causarles daño, los depredadores renunciaron a su independencia y se establecieron definitivamente en el interior de las células hospedadoras. Al igual que los jabalíes domesticados que viven pacíficamente en la pocilga como cerdos, o como el «mejor amigo del hombre», el perro, que fue un lobo en tiempos pasados, los gérmenes causantes de enfermedades mortales fueron domesticados y se hicieron inofensivos. Según una hipótesis muy extendida para explicar el desarrollo de la membrana nuclear, la presa dependía de sus ocupantes consumidores de oxígeno porque protegían su DNA del oxígeno venenoso cada vez más abundante en el mundo exterior.

La presa original debió de ser una bacteria de gran tamaño como *Thermoplasma.* Aunque *Thermoplasma* tolera el oxígeno, puede utilizarlo sólo en pequeñas cantidades, bastante más pequeñas que las presentes en nuestra moderna atmósfera.[33] La bacteria presa puede haber sido un microbio resistente, capaz de proteger las mitocondrias en ambientes adversos. Sobreviviendo en aguas muy calientes y ácidas, como las encontradas en los manantiales termales del Parque Nacional de Yellowstone (EUA), *Thermoplasma* es hasta el presente la mejor hi-

pótesis para explicar el antepasado bacteriano de la más importante porción citoplasmática de la célula eucariótica. Y hay otra razón para creer que *Thermoplasma* es el candidato a microorganismo huésped precursor más verosímil. Su DNA, a diferencia del de otras bacterias, se encuentra envuelto por determinadas proteínas parecidas a las histonas de casi todos los eucariontes.

La síntesis de esteroides puede haber sido una propiedad resultante de la simbiosis mitocondrial. Para fabricar membranas flexibles, los eucariontes se envuelven de esteroides, moléculas complejas de lípidos tetracíclicos que precisan oxígeno atmosférico en el proceso de su síntesis. Los esteroides lubrican las proteínas de las membranas, haciendo que tanto las externas como las internas sean flexibles, fáciles de romper y de fusionar en un amplio espectro de temperaturas. Las membranas que contienen esteroides forman vesículas. Envuelven tanto a las mitocondrias como al mismo núcleo. Los pasos bioquímicos que se dan en la síntesis de los esteroides empiezan en el citoplasma de la célula, pero los últimos pasos del proceso se verifican en las mitocondrias. La necesidad de oxígeno para la síntesis de esteroides y el hecho de que dicha síntesis vaya asociada a las mitocondrias, parece indicar que quizá surgió de la nueva relación creada entre las bacterias aeróbicas y sus poco dispuestos hospedadores; es decir, entre depredador y presa.

El depredador, al encontrarse cómodo, perdió gradualmente algo de su DNA y de su RNA. La selección natural suele eliminar la redundancia cuando la simbiosis evoluciona. Así, si ambos organismos sintetizan un nutriente necesario, por ejemplo, uno de ellos puede perder poco a poco la capacidad de producirlo, aumentando de esta manera su interdependencia. En la actualidad las mitocondrias dependen totalmente del resto de la célula. Comparten los genes de la célula hospedadora, que codifican la producción de algunas de sus proteínas, incluyendo alguna de las enzimas necesarias para la replicación de su propio DNA y RNA. La célula utiliza la energía que las mitocondrias obtienen a partir del oxígeno y las mitocondrias utilizan los ácidos orgánicos que eran los productos de desecho de la célula presa. La interrupción de estos procesos representa la muerte para cualquier ser vivo compuesto.[34]

Pero, ¿qué ocurre con la presa? Las células de mayor tamaño invadidas por los parásitos también deben de haber sido bacterias. Debieron de ser parecidas a la moderna *Thermoplasma,* o a *Sulfolobus,* emparentada con aquélla. *Thermoplasma,* bacteria muy adaptable y resistente, es muy resistente a las temperaturas extremas y a la acidez, lo que era un valiosísimo atributo en el mundo del Proterozoico. *Thermoplasma* y *Sulfolobus* pertenecen a un grupo de bacterias con ribosomas y RNA ribosómico característicos que se conoce desde hace poco tiempo. Estos organismos se denominan *Arqueobacterias* (bacterias antiguas) debido a que los rasgos que comparten entre ellas y con todos los eucariontes han sugerido a algunos científicos la existencia de una separación del resto de bacterias que viene de antiguo. Otras bacterias que nos resultan más familiares, como *Escherichia coli* y *Bacillus,* se conocen como *Eubacterias* (bacterias verdaderas).

Al convivir de manera simbiótica, las arqueobacterias y sus invasores eubacterianos consiguieron juntos lo que no habrían conseguido de haber vivido independientemente. Sus descendientes llegaron a constituir los cimientos del macrocosmos. Todas las criaturas de la Tierra, que en la actualidad parecen tan normales, de las algas marinas a lo erizos, al león marino y al marinero, están formadas por células con núcleo. Las mismas células con núcleo son el resultado de fusiones de procariontes. Y toda célula con núcleo está repleta de mitocondrias de respiración profunda que en tiempos inmemoriales fueron bacterias.

Quizás unos cien millones de años después de que las mitocondrias quedasen establecidas, un nuevo tipo de organismos se unió a ellas en el citoplasma de ciertas células. Pero el origen de esta unión no fue la infección, sino la ingestión. De la misma manera que Jonás fue tragado por la ballena, los ante-

pasados de los plástidos (los órganos fotosintéticos de las células con núcleo) probablemente fueron ingeridos por hambrientos protoeucariontes. Esos antepasados debieron de ser las cianobacterias que se encuentran por todas partes, los mismos seres que, con tanto éxito, tejieron los tapetes microbianos y construyeron los rascacielos estromatolíticos. Ingeridas de manera rutinaria, algunas de estas bacterias aparentemente resistieron la digestión en el interior de sus hospedadores con sus pigmentos captadores de luz aún activos.

Actualmente, encerrados en el interior de todas las plantas y de muchos protistas (como la móvil *Euglena*), los plástidos llenan la biosfera de nutrientes y oxígeno, una contribución mucho mayor que ninguna otra que hayan podido hacer todos los mamíferos de la Tierra juntos. Los plástidos fabrican nutrientes a partir de agua y luz solar. Los mamíferos, incluyendo naturalmente al ser humano, no pueden hacer tal cosa. Desde una perspectiva planetaria, el papel de los mamíferos puede ser el de fertilizadores de los vegetales y el de ser portadores de mitocondrias. Pero si todos los mamíferos murieran instantáneamente, los insectos, los pájaros y otros organismos serían los portadores de mitocondrias y fertilizarían las plantas. Sin embargo, si los vegetales con sus plástidos desaparecieran súbitamente, la producción de nutrientes en el planeta se vería dificultada de tal manera que seguro que todos los mamíferos morirían.

Los plástidos verdes (llamados cloroplastos) de las plantas y algas verdes son mayores e incluso más parecidos a bacterias que las mitocondrias. Tienen también su propio DNA y RNA mensajero. Sus ribosomas también son del mismo tamaño que los de las bacterias. Como en el caso de las mitocondrias, los plástidos se encuentran aislados del resto de la célula por una membrana. Su DNA, al igual que el DNA bacteriano, carece de la histona que se encuentra mezclada con el DNA de los cromosomas. También se dividen directamente en dos, como las bacterias. Y el DNA, RNA y proteínas que producen estos orgánulos son extraordinariamente semejantes a los de las bacterias, especialmente a los de las cianobacterias.

A pesar de haberse desprendido de la mayor parte de los

utensilios necesarios para su autosuficiencia, los plástidos pueden sintetizar muchas de sus proteínas. La mayoría, pero no todos, han conservado los sistemas fotosintéticos con pigmentos verdes, rojos o verdeazulados que les permiten automantenerse. Si bien es cierto que todas las células vegetales contienen algún tipo de plástido, los hay también incoloros, no fotosintéticos. Nadie sabe exactamente para qué sirven los plástidos pálidos, pero su presencia indica una antigua alianza de organismos muy dispares.

A finales de los años sesenta, Ralph Lewin, biólogo marino del Instituto Scripps de Oceanografía en California, descubrió una obscura bacteria de color verde en varias localidades del *Sunbelt*,* del océano Pacífico (frente a las costas de Baja California, Singapur y las islas Palau). Lewin dio el nombre de *Prochloron* a este microorganismo. *Prochloron* crece sobre las ascidias, unos invertebrados marinos en forma de limón que viven fijos. Al recubrirlos, los colorea de verde y probablemente les proporcionan también determinados nutrientes. Algunas larvas de ascidias incluso llevan bolsas repletas de *Prochloron* para asegurar su crecimiento simbiótico en la siguiente generación. El gran tamaño de las células y el color verde de *Prochloron* hacía suponer que, como el protista *Chlamydomonas*, o los simbiontes de las hidras verdes, *Prochloron* era un alga verde. Sin embargo, las primeras fotografías obtenidas por microscopía electrónica demostraron, sorprendentemente, que no se trataba de un alga, sino de una enorme bacteria.

Prochloron, poca cosa más que una máquina de DNA limitada por una membrana y cargada de pigmentos vivos, sería un cloroplasto si no fuera porque tiene pared celular y vive en el exterior de una ascidia en vez de encontrarse en el interior de una planta. Esta bacteria es un eslabón perdido en la historia de la simbiosis y combina la fisiología de un vegetal con la estructura de una bacteria. (Las cianobacterias también son verdes, en realidad verdeazules, pero su fisiología es diferente

* *Sunbelt* es como se denomina —de una manera informal— la zona más meridional de los Estados Unidos, por su clima soleado. Se refiere aquí a la zona tropical del océano Pacífico. *(N. del T.)*

de la de las algas verdes y las plantas. *Prochloron* contiene clorofilas *a* y *b,* lo que hace que esta bacteria sea más parecida a los vegetales, desde el punto de vista metabólico, que las cianobacterias, que sólo contienen pigmentos azul verdosos y clorofila *a*.) Parece muy probable que los antepasados de *Prochloron* fuesen ingeridos por muchos tipos de protistas. Algunos debieron de resistir la digestión y los que sobrevivieron evolucionaron y acabaron convirtiéndose en plástidos. Las plantas actuales se sienten atraídas por la luz solar porque, sin ella, sus exigentes inquilinos morirían.

W. Ford Doolittle, bioquímico de la Universidad de Dalhousie en Nueva Escocia (Canadá), comparó la secuencia de las bases de nucleótidos en el RNA ribosómico de los plástidos rojos de las algas marinas del género *Porphyridium* con la del RNA celular de las mismas algas y encontró que la semejanza era inferior al 15 por ciento. Luego comparó la secuencia con el RNA ribosómico de la cianobacteria *Synechococcus* y con el de un plástido verde del protista *Euglena.* Las semejanzas eran del 42 y del 33 por ciento respectivamente. Esto convenció a Doolittle y a otros de que las cianobacterias son los antepasados de los plástidos rojos, o rodoplastos, de las algas rojas. De la misma manera (aunque no se ha realizado un estudio detallado de la biología molecular), los plástidos verdes corrientes de los vegetales probablemente proceden de *Prochloron.*

Mirando el mundo de la naturaleza alrededor nuestro es evidente el gran éxito de los descendientes de *Prochloron:* selvas, jardines, plantas de interior, las verdes praderas de nuestros montes... Ejemplos todos del éxito de los plástidos, que ingeridos, pero no digeridos, se insinúan en cada rincón del planeta, siempre presentes en la asociación cooperativa llamada célula eucariótica.

Los nuevos eucariontes se habían diversificado, y ahora algunos tenían dos mecanismos básicos de obtención de ATP: la respiración y la fotosíntesis. Los que además adquirieron la capacidad de nadar fueron prácticamente imparables en su expansión hacia ambientes compatibles cada vez más lejanos. No

es sorprendente que, en forma de algas y fitoplancton, empezaran a dominar los océanos y otros lugares húmedos del mundo. Lo cierto es que siguieron evolucionando hasta el punto de dejar el agua, ocupar la tierra y acabar siendo las plantas primigenias del macrocosmos.

9
El cerebro simbiótico



Desde nuestra posición actual, tan alejada en el tiempo evolutivo, no podemos decir exactamente cuándo, pero aproximadamente por la misma época —o quizás algo antes— en que la incorporación de bacterias dio a las células la capacidad de utilizar oxígeno y luz, parece que también les confirió otra capacidad: la de la motilidad. Al unirse a las nuevas células, que eran grandes, las bacterias de movimiento rápido les proporcionaron las ventajas básicas de la locomoción, a saber, eludir el peligro y poder buscar alimento y cobijo, aparte de otros beneficios —una mayor selección de hábitats y más oportunidades de intercambio genético—. En cualquier caso, el más obvio de aquellas asociaciones de organismos distintos fue la motilidad.

Si examinamos la célula eucariótica bajo el microscopio, quedaremos maravillados por el vigoroso movimiento que se observa en su interior. En contraste con la célula bacteriana, cuyo contenido no presenta movimiento alguno o, si se mueve, lo hace de manera pasiva, el interior de la célula eucariótica muestra una circulación que recuerda una ciudad en miniatura. El citoplasma es fluido. En algunas células las mitocondrias, los ribosomas y otros orgánulos se desplazan siguiendo vías determinadas como si obedecieran señales de tráfico en ambos sentidos. Muchas células se expanden y contraen de manera rítmica. En un camaleón que cambia de color, las partículas de pigmento se trasladan desde la superficie al interior de la célula cuando el animal adquiere una tonalidad más pálida. En los actinópodos, microorganismos del reino de los protistas (véase la nota 10), unas largas púas móviles que sirven para agarrar a sus presas o como zancos para «andar», se extienden desde la superficie de la célula. En general, el desplazamiento celular de este tipo se realiza a lo largo de un elaborado sistema de transporte por el interior de la célula constituido por microtúbulos, que son pequeñísimos tubos de proteína de tan sólo 240 Å de diámetro y que en concierto con otras proteínas pueden causar movimiento.[35] Los microtúbulos sólo son visibles con el microscopio electrónico.

Creemos que la capacidad de movimiento exterior e interior que tienen las células con núcleo es la contribución de otra unión simbiótica con bacterias; en este caso con las veloces espiroquetas, que presentan un movimiento de tipo flagelar. A diferencia de las teorías semejantes para explicar el origen de mitocondrias y plástidos, esta hipótesis no goza aún de popularidad entre los biólogos. En el correspondiente aparato del interior de la célula no se ha encontrado DNA que encierre la clave del funcionamiento de la que debió de ser en un tiempo pasado una célula independiente. Esto hace que muchos científicos se muestren aún reacios a considerar el origen bacteriano de las proyecciones celulares constituidas por microtúbulos. Pero el RNA que ha sido localizado en algunas de las partes en cuestión puede que sea directamente responsable, sin la ayuda directa del DNA, de la construcción y replicación de las estructuras causantes del movimiento. Como vimos en anteriores capítulos que trataban de materia preanimada, el RNA puede autorreplicarse y puede incluso haber producido el primitivo DNA. Si se llega a comprobar que el RNA de las espiroquetas y sus proteínas se parece más al RNA y a las proteínas de las estructuras causantes del movimiento celular que a otros RNA y proteínas escogidos al azar, será difícil oponerse a la hipótesis simbiótica.

Naturalmente, existe una paradójica relación inversa entre la simbiosis y la existencia de pruebas de la misma. Los or-

ganismos asociados que conviven en armonía casi perfecta serán apenas discernibles. David Smith, botánico de la Universidad de Oxford, compara los restos de tales uniones con la sonrisa del gato Cheshire, el personaje de *Alicia en el país de las maravillas* que va desapareciendo poco a poco hasta que no queda de él más que una enigmática sonrisa: «El organismo va perdiendo piezas de modo progresivo, mezclándose paulatinamente con el fondo general de manera que su anterior existencia es revelada únicamente por alguna reliquia».[36] Bajo esta perspectiva, determinados signos reveladores dan realmente qué pensar.

El estudio detallado de los undulipodios (diminutos «látigos» presentes en muchas células nucleadas) revela una asombrosa uniformidad de estructura a lo largo de una gran variedad de organismos. Estos filamentos reciben el nombre de *flagelos,*[37] si son largos y poco numerosos, como la cola de los espermatozoides, o cilios, si son cortos y numerosos, como pelos; pero no existe una diferencia básica entre ellos. Casi todas las algas, ciliados y mixomicetos —es decir, los protistas, que son los primeros organismos con células nucleadas que se formaron— los poseen. Su movimiento ondulatorio o vibrátil propulsa las células que nadan libremente o, si la célula está fijada al sustrato, agita las partículas que pasan por la zona. Desde la célula reproductora de un helecho macho hasta el revestimiento de las fosas nasales de un ratón, muchas células de organismos complejos poseen estos orgánulos oscilatorios.

Cualquiera que sea la célula u organismo que adornen, los undulipodios tienen siempre un diámetro aproximado de un cuarto de micrómetro y, en sección transversal, muestran una disposición en forma de «disco de teléfono», con nueve pares de minúsculos microtúbulos que rodean otro par situado en el centro. Este modelo, que se conoce con el nombre de «9 + 2» (erróneamente, ya que «nueve» se refiere al número de pares que hay en el círculo exterior mientras que el «dos» se refiere al número de túbulos, considerados individualmente, que hay en el centro), se encuentra en la célula reproductora masculina del toro, de la ballena y del árbol llamado ginkgo; en los cilios de nuestros pulmones, tráqueas y oviductos y en los de otros mamíferos; en las antenas de las langostas, en los cilios que recubren un protista tan conocido como el paramecio y en los de las zoosporas de los mohos acuáticos. Y esto no es más que una pequeña muestra de la frecuencia de estos modelos 9 + 2.

Además, un undulipodio surge invariablemente de una estructura llamada *cinetosoma,* que se compone de nueve tripletes de microtúbulos dispuestos en círculo. Las paredes de todos esos microtúbulos contienen dos proteínas parecidas, las alfa y beta tubulinas. El resto de la estructura 9 + 2 está constituido por casi doscientas proteínas, incluida una extremadamente compleja llamada dineína. Muchas de las proteínas distintas de las tubulinas no han sido aisladas todavía y no se les ha dado nombre, pero la combinación de pruebas es tan concluyente que todos los biólogos dedicados al estudio de la evolución creen que estas estructuras 9 + 2 no habrían podido originarse por vías distintas en protistas, plantas y animales, sino que, por el contrario, debieron de tener un origen común. (Incluso los hongos, a pesar de carecer de undulipodios, siempre presentan microtúbulos y tubulinas, lo cual parece indicar que probablemente sus antepasados tuvieron flagelos celulares que debieron de perder a lo largo de la evolución.)

El microorganismo que proponemos como candidato a precursor común es una bacteria espiral, móvil y filiforme: la espiroqueta, la bacteria más veloz del microcosmos. En las regiones del microcosmos donde habitan las espiroquetas, en el seno de barros gelatinosos y fluidos viscosos, éstas son a menudo las únicas bacterias capaces de desplazarse. Su *oficio* es el movimiento. Algunas también contienen microtúbulos y, aunque hasta ahora no se ha encontrado ninguna con la disposición típica en disco de teléfono, hay pruebas que sugieren que hace tiempo se establecieron pactos entre las primitivas confederaciones bacterianas que constituirían las células nucleadas y espiroquetas o bacterias afines. Las espiroquetas pululaban en el interior y en el exterior de otras bacterias y acabaron proporcionando movimiento eficiente incluso a aquellos organismos que nunca lo habían solicitado. Naturalmente esto

no es más que una hipótesis, pero sirve para explicar datos que de otro modo resultan muy dispares. Como dijo Darwin en *El origen de las especies* en relación a su teoría de la selección natural: «Todo aquel cuya disposición le conduzca a dar más peso a dificultades sin explicación que a la explicación de un determinado número de hechos rechazará, sin duda, mi teoría».[38] La misma afirmación es válida para la hipótesis de las espiroquetas. Puede parecer extraña, pero explica tantas cosas que, sin ella, la historia del microcosmos, de la evolución del sexo y de la meiosis de los llamados organismos superiores quedaría incompleta.

Como siempre, el hambre fue probablemente el motor de estas nuevas uniones. Nuestros antepasados protistas solían estar hambrientos y a veces la inanición los torturaba. Cada uno de los simbiontes bacterianos en el nuevo colectivo pedía alimento, y las alianzas inmóviles se hallaban a merced del medio ambiente. Durante los periodos de sequía y escasez las nuevas células no podían hacer más que esperar. Algunas afrontaron las amenazas ambientales formando cistos resistentes, de paredes gruesas, como hacen tantas células en la actualidad. A medida que estos antiguos antepasados unicelulares quedaban estancados, muchas bacterias móviles arremetían contra ellos y rebotaban en sus paredes celulares. Algunas de aquellas bacterias tan abundantes, en forma de látigo, vivían muy bien alrededor de los cistos, ocupándose de mantener en buen estado la superficie de los mismos, quitándoles la grasa y recogiendo sus migajas. Algunas de las taimadas espiroquetas que se infiltraban resultaron seguramente patógenas para las células que las albergaban. Otras debían de ser totalmente inocuas.

Las espiroquetas libres, que se alimentaban de desechos, siguen siendo muy comunes hoy en día; muchas variedades presentan un tipo de vida en simbiosis o parasitismo con otros organismos, como insectos, moluscos y mamíferos, incluido el ser humano. Algunas viven de manera inofensiva para nosotros en nuestras encías; otras, como *Treponema pallidum*, se encuentran en la sangre de personas afectadas de sífilis.

Las espiroquetas suelen adherirse a las superficies, que pueden pertenecer, o no, a seres vivos. Cuando nadan juntas suelen ondular al unísono, simplemente por su proximidad. Al alimentarse, las espiroquetas descomponedoras que se encuentran en la superficie de su hospedador pueden desplazarlo por el medio con sus ondulaciones coordinadas, especialmente cuando se encuentran amontonadas en un lado.

Las espiroquetas y los protistas que coevolucionaron desarrollando elegantes accesorios nadaban bien. Por lo tanto, conseguían más alimento y se reproducían más a menudo, lo que era, sin duda, una ventaja. La selección natural debió de favorecer estas alianzas hasta que los dos participantes se convirtieron poco a poco en un solo organismo. Tenemos un ejemplo en una determinada especie de ameba moderna, que encoge su undulipodio y come hasta hartarse cuando el alimento es abundante, desplazándose lentamente con un movimiento indolente, típicamente amebiano. Sin embargo, cuando el alimento escasea desarrolla un cinetosoma y un undulipodio y nada en busca de comida.

El advenimiento de las alianzas con espiroquetas, hace 2000 millones de años, debió de alterar el microcosmos de la misma manera que la máquina de vapor alteró la civilización humana. Los nuevos eucariontes móviles debieron de revolucionar el mundo bacteriano con su repentino impulso del transporte y comunicación microbianos. El trasiego de células y, por consiguiente, el flujo de información genética se aceleraron. Y, al igual que la máquina de vapor activó los ciclos de producción industrial, incluida la producción de más máquinas de vapor, la asociación con las espiroquetas pudo haber iniciado un desarrollo frenético, aumentando el número y la diversidad de formas de vida simbióticas.

Es evidente que el desarrollo de buenos lazos con las espiroquetas simbióticas causó probablemente una explosión de especiación microbiana. En la actualidad existen unas ocho mil especies distintas de ciliados, protistas unicelulares de vida libre. Cada una de estas especies se reconoce por el número característico de grupos de cilios y por la manera de agruparse éstos. En realidad, el diseño que forman los cilios en la superficie de algunos microorganismos puede heredarse indepen-

dientemente de los genes del núcleo de las células. Si por medio de microcirugía se extrae una zona de la superficie y se vuelve a colocar del revés, después de la división celular las células hijas heredarán directamente el diseño resultante. Esto también implica un origen independiente para los undulipodios de las células.

Las espiroquetas actuales aún se integran fácilmente en uniones simbióticas a efectos de movilidad. En la porción terminal del intestino de una determinada termita australiana muy voraz vive *Mixotricha paradoxa,* un protista que está completamente cubierto de cilios. Sin embargo, sólo cuatro de ellos, que se encuentran en la parte delantera, son genuinos undulipodios y no participan en el movimiento del microorganismo. El resto de «cilios» son en realidad 500 000 espiroquetas del género *Treponema* que se encuentran adheridas a la superficie, se alimentan juntas y ondulan sincrónicamente. La única misión de los cuatro pequeños undulipodios es la de servir de timones que permitan a *Mixotricha paradoxa* cambiar de dirección.

Las termitas conviven con muchos microorganismos simbióticos. Sin ellos, estos insectos devoradores de madera morirían de hambre, ya que son incapaces de digerir la celulosa por sí mismos. Pero esa reserva vital de bacterias no la adquieren por vía genética, sino por medio de un ritual característico al alimentarse del fluido anal de sus compañeras. Las espiroquetas, nadando individualmente y en masa, impulsan partículas de alimento y microorganismos mayores en el hinchado intestino de la termita. Ajenas al fabuloso mundo exterior de organismos grandes, las espiroquetas disfrutan de una rica fuente de alimento y están protegidas del contacto con el oxígeno.

Uno de los enigmas de la naturaleza de más difícil solución es cómo llegaron estas bacterias a desarrollar los microtúbulos en sus paredes y cómo construyeron, a partir de ellos, ese magnífico aparato que les permite moverse de modo coordinado. Mucho se ha escrito sobre el sistema intracelular de microtúbulos. Y con razón, ya que los microtúbulos participan en la secreción y división celulares y en la formación de la célula nerviosa. Los microtúbulos forman parte, por lo tanto,

de la historia del cáncer y del desarrollo del cerebro. Gran parte de los miles de personas que investigan sobre microtúbulos en nervios, cerebros, esperma y protistas ciliados, aislando y estudiando sus proteínas tubulares, no dejan de preguntarse cuál es el origen evolutivo de esas estructuras de microtúbulos. Si se considera el caso de un origen a partir de las espiroquetas, podrían replicar, como hizo Michael Sleigh, catedrático de biología de Southampton (Inglaterra): «Los sistemas de microtúbulos probablemente se desarrollaron para sostener las proyecciones celulares y para dirigir y quizá conducir la circulación vacuolar... Un origen de este tipo... parece más probable que el origen simbiótico a partir de espiroquetas...».[39] Pero tal argumento ignora el principio básico de que la evolución nunca hace planes por anticipado. El que una célula necesite de microtúbulos y undulipodios no significa que vaya a obtenerlos por evolución. Por otra parte, simbiontes retorcidos por el hambre, al adherirse a las células para sus propios fines, podrían haberse convertido en el sistema celular de undulipodios sin ningún plan previo. Pudieron hacerlo obedeciendo el esquema tradicional de comportamiento que va desde el ataque cruel al compromiso y colaboración finales entre el vencedor y el vencido. En su desesperada búsqueda de alimento, las espiroquetas no lograron devorar a sus víctimas y les proporcionaron, en cambio, rapidez de movimiento. Pero el que restos de espiroquetas formen el sistema de microtúbulos de todos los eucariontes y que el comportamiento de las espiroquetas en cautividad sea el denominador común de muchas funciones elaboradas no es, hoy por hoy, más que una tentadora hipótesis.

La actividad microtubular más misteriosa podría muy bien ser la complicada «danza de los cromosomas» conocida como mitosis, ya que ese método de división celular condujo, entre otras cosas, a la célula animal, es decir, a *nuestras* células. Este ritual intracelular, más complicado que cualquier danza conocida, transforma una célula en dos. Los cromosomas de una célula que está a punto de dividirse se duplican. Cada par está sujeto por un pequeño disco llamado *cinetocoro,* el anzuelo o botón que conecta cromosomas con microtúbulos.

Unos corpúsculos llamados *centriolos* señalan dos polos en la célula animal, como los polos norte y sur en la Tierra. Entre los dos polos se produce un misterioso despliegue de fibras que forma una especie de huso. Si se observa detalladamente, se ve que está constituido por centenares de microtúbulos. Los cromosomas duplicados se disponen a lo largo del ecuador de la célula, unido cada uno a una fibra por un cinetocoro. Entonces se duplican los cinetocoros, al tiempo que liberan cada uno de los miembros del par de cromosomas. Mientras permanecen unidos a los microtúbulos, los cromosomas se separan y se dirigen hacia polos opuestos. Se forma una nueva membrana alrededor de cada grupo de cromosomas, constituyendo dos nuevos núcleos y, a continuación, la célula se divide en dos.

Esta sorprendente y majestuosa danza asegura la duplicación y división exactas del material genético que corresponde a cada una de las células hijas; toda una hazaña si se tiene en cuenta que las células con núcleo generalmente tienen una cantidad de DNA que es miles de veces superior a la de las bacterias. Y, sin embargo, ese DNA, especialmente cuando tiene que trasladarse durante la división celular, permanece perfectamente empaquetado en sus cromosomas. Para imaginar cómo se llegó a este proceso se puede pensar que las presiones selectivas debieron de ser implacables, causando la muerte de aquellas células a las que faltasen algunos genes y de las que tuviesen juegos de DNA incompletos.

Pero la complejidad de la danza mitótica se hace más comprensible si se considera que el coreógrafo es una espiroqueta. Y las pistas son éstas. El huso está hecho de microtúbulos, los mismos que se encuentran en los cilios o en las colas de los espermatozoides. Los centriolos de los polos celulares están compuestos de la misma estructura de nueve tripletes de microtúbulos dispuestos en círculo. Los centriolos son realmente idénticos a los cinetosomas, con la única diferencia de que no tienen cilios. Sin embargo, en muchos organismos los centriolos pueden transformarse rápidamente en cinetosomas con sólo desarrollar cilios celulares (undulipodios) en cuanto la división celular ha concluido.

El momento en que se realiza cada uno de los procesos celulares proporciona una pista sobre los distintos papeles que las espiroquetas jugaron en la evolución. En vegetales y animales, undulipodios y mitosis son mutuamente excluyentes; nunca coinciden simultáneamente en una misma célula. Las células de los hongos parece que han intercambiado permanentemente sus cilios, de los cuales carecen, por la mitosis. Pero algunos protistas, para dividirse, primero tienen que replegar sus undulipodios hacia el interior de las células. Ninguna célula de mamífero (por no referirnos ya a otros tipos de células) puede retener los undulipodios mientras se divide por mitosis. Es como si la célula tuviese que usar sus antiguas espiroquetas simbióticas para una cosa o para la otra, pero no para ambas al mismo tiempo.

Al igual que los personajes de un cómic tratando de descubrir la verdadera identidad del héroe enmascarado, los científicos han observado que las dos estructuras microtubulares nunca aparecen juntas, pero no han sido aún capaces de probar que se trate de una misma estructura única. No podemos probar que el huso mitótico y los cilios vibrátiles sean los mismos vestigios de espiroquetas con disfraces distintos. Pero los datos sugieren que se trata de una única identidad biológica.

Por desgracia, el científico no puede ver los cuerpos serpenteantes de las espiroquetas empotrados y dividiéndose directamente como orgánulos en el citoplasma de la célula, como ocurre con los cloroplastos y las mitocondrias. Lo único que ve, en cambio, es lo que se conoce como sistemas organizadores de microtúbulos, pequeñísimos centros visibles sólo por microscopía electrónica que preceden al desarrollo de los microtúbulos individuales, centriolos, cinetosomas y púas de los actinópodos. Muchos biólogos se han preguntado por qué «se preocupa» la célula en la elaboración de los complicados discos de teléfono y han considerado los centriolos uno de los «enigmas centrales» de la biología.[40] De ser cierta la teoría de las espiroquetas simbióticas, todas las estructuras 9 + 2 serían reliquias evolutivas, y los centros organizadores de microtúbulos serían los verdaderos vestigios de las poblaciones de espi-

roquetas incorporadas hace mucho tiempo por las células hospedadoras.

Cuando las comunidades microbianas que se convertían en organismos eucarióticos adquirieron por primera vez ácido nucleico a partir de las espiroquetas invasoras, probablemente lo utilizaron únicamente para dirigir la producción de una nueva generación de espiroquetas cuya función era propulsar la comunidad. Pero las comunidades de bacterias invadidas que se convirtieron en nuevas células adoptaron entonces los genes de las espiroquetas para coordinar la división del pesado material genético de la comunidad. El resultado de tal adopción de genes en el interior de las nuevas células fue a menudo una ausencia de undulipodios y motilidad en el exterior de la célula.

Actualmente todos los hongos y las algas rojas, así como bastantes amebas, ciertas algas verdes conjugadas y muchos otros eucariontes han mantenido la mitosis pero no los undulipodios; estos seres muestran lo conveniente que resulta poseer un complejo sistema interno para el transporte de los cromosomas durante la reproducción y el problema que representa poseer tal sistema y undulipodios externos al mismo tiempo. Estos organismos no han llegado nunca a resolver la contradicción esencial de mantener simultáneamente el equipo interno para la movilización de los cromosomas y flagelos sobresaliendo de la célula, estructuras basadas ambas en el sistema de microtúbulos. El movimiento de los cromosomas en toda reproducción era más importante, por lo tanto perdieron sus flagelos celulares.

Mantener la división mitótica sin sacrificar los undulipodios era un dilema que dio lugar a una serie impresionante de soluciones experimentales entre las distintas formas de vida, muchas de las cuales tuvieron suficiente éxito como para persistir hasta hoy en día. Algunos organismos presentan mitosis y motilidad, pero en fases diferentes de sus ciclos vitales. Los ciliados mantuvieron centenares de undulipodios (cilios) a costa de dividir sus núcleos por medios distintos de la mitosis típica. Otros, algunos de los cuales dieron origen a las plantas, sólo forman undulipodios durante el desarrollo de sus espermatozoides. Aunque móviles, las colas de las células espermáticas son undulipodios y esas células no pueden, por lo tanto, dividirse nunca por mitosis. Están destinadas únicamente a la fecundación de los óvulos, que, aunque pueden dividirse, no tienen nunca undulipodios.

Es muy probable que surgieran miles de variaciones sobre estos temas y que luego desaparecieran. Los caminos de la naturaleza son tales que aquellas soluciones tan perfectas que no dejaron lugar a mejoras posteriores a menudo tuvieron un fin prematuro. Los organismos que consiguieron mantener movilidad y divisibilidad en una misma célula han llegado en su mayor parte como células individuales hasta nuestros días.

El paso que iba a conseguir un éxito espectacular fue aquel que mantuvo abiertas mayor número de opciones: se formaron unos organismos que desarrollaban un undulipodio en una célula pero conservaban otra célula adherida a aquella que aún podía dividirse. El undulipodio podía entonces propulsar a las dos células.

Esta innovación abrió el camino para nuevas cotas de complejidad estructural. Siguieron esta vía evolutiva organismos que poseen una célula germinal con una única finalidad reproductora y un cuerpo multicelular altamente diferenciado para muchísimas funciones específicas. Este es en realidad el plan básico de nuestros cuerpos. Nuestras células germinales, espermatozoide y óvulo, son las únicas que pueden reproducir un ser humano, a pesar de que todas y cada una de las células de nuestro cuerpo contienen una copia completa de todos nuestros genes.

El cuerpo es totalitario en cuanto a la regulación de los genes. Cuando una célula se especializa como célula muscular, por ejemplo, es para siempre. La única excepción a esta regla de papeles permanentes en el interior del cuerpo se da en el cáncer, en que las células parecen regresar a la condición más primordial para reproducirse continuamente sin tener en cuenta su lugar en el cuerpo ni su función. Entonces, los cromosomas se separan y las mitocondrias se reproducen más rápidamente incluso que las células de las que forman parte. Normalmente, cuando una célula opta por desarrollar undulipodios, puede considerarse muerta desde el punto de vista de la evolución:

ya no puede desarrollarse más. Pero, como si desobedecieran toda autoridad, algunas células cancerosas en cultivos de tejidos llegan a desarrollar undulipodios, que hacen desaparecer justo antes de la mitosis. Es como si las difíciles alianzas de las colaboraciones simbióticas que mantienen las células se desintegraran. Los simbiontes no están de acuerdo y, una vez más, imponiendo sus tendencias independientes, reviven su antiguo pasado. Las razones, desde luego, no están nada claras, pero el cáncer más parece ser una regresión intempestiva que una enfermedad. La compleja interacción de distintas substancias químicas en el interior del cuerpo regula los genes y produce la diferenciación celular. Cuando estas substancias químicas se alteran o adulteran por la introducción de humo de tabaco, nitrato de sodio u otras substancias cancerígenas, ya no pueden cumplir su misión. Es natural que las células se comporten entonces como los alumnos de una clase cuando el profesor está ausente: se alborotan, salen de sus «asientos» celulares, juegan y se reproducen de manera caótica e irresponsable.

Es fácil olvidar que la simbiosis continúa dándose a todos los niveles de la biota. Las espiroquetas, por ejemplo, tratando de vivir a costa de sus colaboradores y víctimas. Espiroquetas simbióticas actúan como undulipodios y verdaderos undulipodios actúan como organismos independientes. Los undulipodios separados de las células espermáticas, es decir, colas de espermatozoide separadas del cuerpo celular, siguen nadando y pueden sobrevivir desde unos minutos hasta varias horas. Por otra parte, espiroquetas sanas pueden penetrar la pared celular de algunos protistas y refugiarse en su interior, donde continúan nadando. A veces, ya en el interior de la célula en que cumplen su enigmática misión, se reproducen. Su comportamiento no es nada claro, a menos que estén tratando de mostrar al observador humano, sobreviviente a su vez de emparejamientos y desemparejamientos entre bacterias, cómo la historia se repite.

O mejor deberíamos decir que la historia da vueltas sobre sí misma. Porque en el interior del ojo que mira a través del microscopio, diminutos bastones y conos —células nerviosas

especializadas en la percepción de la luz— responden a la luz y a estímulos mutuos enviando mensajes químicos y eléctricos a lo largo de axones y dendritas —los brazos fibrosos de las neuronas— hasta el cerebro. Cortes transversales de los bastones y conos retinianos nos muestran la disposición 9 + 2 típica de los microtúbulos. Los axones y las dendritas del cerebro son una masa de microtúbulos organizada de distinta manera: contienen las proteínas propias de los microtúbulos, pero no se da la disposición 9 + 2. Algo en los ojos desencadena la transmisión de ondas a través de las sinapsis entre los axones densamente empaquetados y las dendritas de las células cerebrales. Cabalgando en esas ondas está la siguiente reflexión: ¿El sistema de motilidad de las espiroquetas en el microcosmos evolucionó en el medio ambiente ordenado de organismos mayores para llegar a ser la base de su sistema nervioso?

Poco a poco se van acumulando pruebas sobre la identidad de las espiroquetas en las células del cerebro, más allá de la abundante presencia en ellas de microtúbulos (neurotúbulos). Las tubulinas alfa y beta son las proteínas solubles más abundantes en el cerebro. Dos o tres proteínas que se encuentran en las espiroquetas de las termitas tienen semejanzas inmunológicas con las tubulinas del cerebro y de todos los undulipodios. Una vez alcanzada la madurez, las células cerebrales nunca se dividen ni se desplazan. Pero sabemos que las células cerebrales de los mamíferos (la fuente de tubulina más rica que se conoce) no utilizan su rico patrimonio microtubular. Lo que hacen, en cambio, como única función, una vez se han reproducido y ordenado, es enviar señales y recibirlas, como si los microtúbulos que se habían utilizado para formar los undulipodios y para el movimiento de los cromosomas hubieran sido usurpados para la función del pensamiento.

Al explicar su proceso de raciocinio en una carta a Jacques Hadamard, Albert Einstein escribió que para explorar el mundo físico utilizaba símbolos no verbales, un lenguaje abstracto constituido por «elementos reproducibles». Explicando

cómo había llegado a sus espectaculares descubrimientos, decía: «Las palabras o el lenguaje, ya sea en forma escrita u oral, no desempeñan para mí ningún papel importante en los mecanismos del pensamiento. Las entidades psíquicas que parecen ser los elementos del pensamiento son determinados signos, así como imágenes más o menos claras, que pueden ser reproducidas y combinadas "voluntariamente"». Einstein afirmó también que, para él, no existía una diferencia esencial entre la «simple asociación o combinación de elementos reproducibles y el conocimiento [en sí]».[41] Si las espiroquetas son verdaderos antepasados de las células cerebrales o neuronas, entonces los conceptos y señales del pensamiento se basan en capacidades físicas ya latentes en las bacterias. Los «elementos reproducibles» del cerebro de Einstein puede que le hayan precedido en una forma diferente, prosperando hace tres mil millones de años en el ambiente anaeróbico de la Tierra primitiva.

Einstein creía que su proceso de elaboración del pensamiento se desarrollaba por medio de un «juego bastante impreciso entre los elementos antes mencionados». Considerándolo desde el punto de vista psicológico, concluía: «Este juego combinatorio parece ser la característica esencial en el pensamiento productivo, antes de que se dé cualquier conexión con la construcción lógica de las palabras u otro tipo de signos que se puedan comunicar a otros». De manera semejante, el brillante matemático John von Neumann comparaba los impulsos de las células nerviosas que intervienen en el proceso cognitivo humano con las operaciones de las computadoras. Al afectar las células nerviosas sólo a sus vecinas inmediatas, y además con relativa lentitud e imprecisión, Von Neumann suponía que su lentitud orgánica quedaba compensada por su enorme abundancia y por el hecho de que actuasen simultáneamente (en paralelo) en vez de hacerlo en serie, operación tras operación, que es como trabajan los ordenadores existentes en la actualidad (aunque los japoneses trabajan con ahínco para desarrollar los ordenadores de la llamada quinta generación, que actuarían en paralelo y serían los ordenadores que imitarían más de cerca el comportamiento humano). Además

Von Neumann sospechaba que, pese a encontrarse en la base de los ordenadores digitales, las cuatro «especies fundamentales de la aritmética», es decir, suma, resta, multiplicación y división, no eran las verdaderas matemáticas del sistema nervioso. Von Neumann llegó a la conclusión de que, al igual que el griego o el sánscrito son hechos históricos y no necesidades lógicas absolutas, la lógica y las matemáticas debían de ser, de manera similar, formas accidentales de expresión. Hacia el final de su último libro, *El ordenador y el cerebro*, indicaba que «la lógica y las matemáticas en el sistema nervioso central, cuando se consideran como lenguajes, deben ser esencialmente diferentes en estructura de aquellos lenguajes que nuestra experiencia normal toma como referencia».[42] ¿Es posible que el verdadero lenguaje del sistema nervioso fuera, por tanto, un vestigio de las espiroquetas, una combinación de DNA autocatalítico y tubuloproteínas integradas, de manera simbiótica, en la red de hormonas, neurohormonas, células y sus productos de desecho, es decir, lo que llamamos cuerpo humano? Y el pensamiento individual ¿sería también superorganísmico, es decir, un fenómeno colectivo?

Una y otra vez, el estudio del microcosmos nos hace albergar la idea de que las capacidades humanas provienen directamente de otros fenómenos. La naturaleza posee una determinada sabiduría, que forma parte de otra superior; nuestras aptitudes deben de ser muy poca cosa en comparación con la biosfera de la que constituimos una parte relativamente exigua. Pero no existe una discontinuidad entre el ser humano y el camino general de la evolución, entre nosotros y los caudales y flujos de materia, información y energía. Ni el pensamiento humano —último refugio de los que insisten en la «superioridad» humana— puede ser aislado o disociado de los hechos más importantes de la vida. Todos nuestros inventos predilectos fueron anticipados por nuestros compañeros de planeta. ¿Por qué no el pensamiento? Si la «luz fría» bacteriana (bioluminiscencia) precedió a la luz eléctrica en dos mil millones de años; si el protista *Sticholonche* se impulsaba por medio de remos microtubulares a lo largo del Mediterráneo mucho antes de que las galeras romanas surcaran las mismas aguas; si los

caballos recorrían las praderas, las ballenas los mares y los pájaros los cielos mucho antes de que lo hicieran los coches, los submarinos y los aviones, ¿resultaría inverosímil, después de todo, que los simbiontes bacterianos hubiesen creado vías de información tan importantes como la mecánica cuántica o la teoría de la relatividad? En cierto sentido, estamos «por encima» de las bacterias, dado que, al estar formados por ellas, nuestro poder mental parece representar más que la suma de sus componentes microbianos. Pero, en cierto modo, estamos también «por debajo» de ellas. Como minúsculas partículas de una enorme biosfera cuya esencia es básicamente bacteriana, nosotros, junto con otras formas de vida, debemos sumarnos a un cerebro simbiótico que supera nuestra capacidad de comprender o de representar fielmente.

Nuestra propia historia humana va progresando a saltos en su recorrido por el mundo; saltos tan sorprendentes como el de las bacterias al cerebro. Nuestra biología ha producido la tecnología humana, que a su vez nos ha catapultado mucho más lejos de lo que suponíamos eran nuestros límites biológicos. Por ejemplo, los primeros humanos sólo disponían de sus propios cuerpos como medio de comunicación a larga distancia, ya sea corriendo, gritando o tocando el tam-tam; nosotros hemos avanzado y, pasando por el caballo de vapor, el automóvil, las ondas de radio, la electricidad y la aerodinámica, hemos logrado enviar nuestros mensajes vía satélite, casi a la velocidad de la luz.

A medida que la tecnología aumenta nuestras posibilidades, cada vez resulta menos necesario desplazar nuestro cuerpo para recibir o enviar información o productos y, en general, para hacer progresar nuestra civilización. Antes, por ejemplo, teníamos que salir de casa para entregar un mensaje a distancia. Ahora es posible no tan sólo telefonear, sino también cocinar, moler café, contestar a quien llama a la puerta de nuestra casa, hacer sonar la alarma contra robos, apagar las luces y ver el mundo por televisión. En resumen, compaginar una vida de cara al exterior y otra doméstica, sin salir de casa. Antes, los topógrafos tenían que recorrer la zona cuyo mapa estaban trazando. Ahora, sentados ante su mesa de trabajo, los

técnicos obtienen las fotos vía satélite de un continente con sólo pulsar unas teclas.

Hace tiempo, las espiroquetas microscópicas tenían que nadar frenéticamente para sobrevivir. Ahora, transcurridos millones de años, encerradas en un órgano llamado cerebro, los vestigios de sus nucleótidos y de sus proteínas conciben y dirigen los actos de una amalgama muy compleja de asociaciones bacterianas muy evolucionadas denominada ser humano. Es posible que haya grupos de humanos, sedentarios y reunidos en comunidades, ciudades y redes de comunicación electromagnética, que hayan empezado ya a formar un circuito que supere el pensamiento, como el propio pensamiento ha superado el movimiento coordinado de las espiroquetas. La probabilidad de que nos percatemos de la totalidad de una forma tal de organización superior no es mayor que la que tienen los componentes individuales de las células cerebrales (microtúbulos, los supuestos vestigios de las espiroquetas) de comprender su propia misión en la conciencia humana.

Aunque la hipótesis de las espiroquetas no ha sido probada, sugiere una simbiosis aún más antigua que las de cloroplastos y mitocondrias con las células hospedadoras invadidas. Podemos remontar la simbiosis de las espiroquetas a una época anterior al tiempo en que las células presa y las bacterias respiradoras de oxígeno se agruparon para formar las primeras células en su camino para convertirse en células nucleadas. Para ello nos basamos en el ejemplo actual de algunos protistas, como *Trychonympha*, que sobreviven desde la época anterior a las bacterias aeróbicas y después de que las espiroquetas hubiesen invadido las células huésped. *Trychonympha* posee mitosis, lo que hace pensar que conserva intactos los sistemas de motilidad de las espiroquetas; sin embargo, carece de mitocondrias. Antes de que los respiradores de oxígeno lograran establecerse y empezaran a desarrollar una membrana alrededor del núcleo, las espiroquetas anaeróbicas ya proliferaban en el interior de nuestras células ancestrales. Ellas arrastraron tras de sí los cromosomas en un sistema casi perfecto

de distribución reproductora. Y al mantener la capacidad de producir un undulipodio, mantuvieron su posibilidad de desplazamiento celular rápido; opción que se ejerce cada vez que la célula espermática emprende su desenfrenada carrera en busca del óvulo.

10 El enigma del sexo



Un espermatozoide va nadando al encuentro de un óvulo. Su cola, que es en realidad un undulipodio, le proporciona el impulso necesario para ello. En la superficie del óvulo se producen determinados cambios químicos que permiten la entrada del espermatozoide. Luego, como ocurre con el módulo ya utilizado de un cohete espacial, la cola se desprende. La cabeza, que alberga el núcleo de la célula, penetra en el óvulo y acaba fusionándose con el núcleo de éste para producir una única célula nucleada y con un número doble de cromosomas.

Esto forma parte del ciclo sexual meiótico, la sexualidad típica de las células eucarióticas. Si la sexualidad de tipo procariótico probablemente evolucionó en el eón Arqueense hace más de 3000 millones de años, la sexualidad meiótica evolucionó en los protistas y en sus descendientes pluricelulares, organismos constituidos por células con núcleo y que no son hongos, animales o vegetales. Este tipo de sexualidad probablemente evolucionó a finales del eón Proterozoico, hace unos 1000 millones de años. Sin duda, es anterior a la aparición de los animales de cuerpo blando de la fauna de Ediacara, muy abundantes hace 700 millones de años.

A primera vista, incluso considerándola con detenimiento, este tipo de sexualidad parece superflua e innecesaria. No posee ninguna de las ventajas de la transferencia genética entre

bacterias libres que se da por todo el macrocosmos. Siguiendo la terminología económica utilizada por los biólogos para su descripción, el «coste» de este tipo de sexualidad (que produce células sexuales especializadas, con la mitad del número normal de cromosomas y a la búsqueda de pareja para realizar el acto de la fecundación en el momento oportuno) no guarda proporción con cualquier posible ventaja.

Los animales y vegetales que se reproducen de manera sexual constituyen actualmente grupos que han logrado un gran éxito, de eso no hay duda. Y los biólogos han inventado una especie de historia para explicar la existencia del sexo: afirman que perdura porque aumenta la variedad y acelera la evolución. Pero nosotros opinamos que los vegetales y animales complejos se han conservado hasta el presente por razones que no están relacionadas con la existencia de los dos sexos. Es más, creemos que los vegetales y animales se han diseminado por todo el mundo a pesar de la reproducción sexual.

En el sentido biológico, y como ya hemos indicado anteriormente, la sexualidad significa la unión de material genético procedente de más de un origen distinto para producir un individuo nuevo. No tiene nada que ver con la copulación, ni está relacionado de manera intrínseca con la reproducción o la existencia de machos y hembras. De acuerdo con esta definición estricta, el acto de pasar ácido nucleico a una célula desde un virus, una bacteria, o de cualquier otro origen, es sexualidad. La fusión de dos células germinales humanas es sexualidad. Incluso la infección del ser humano por el virus de la gripe constituye un acto sexual mediante el cual se inserta en nuestras células material genético. La simbiosis es como el sexo en tanto que el material genético de individuos distintos se une finalmente para formar un nuevo individuo. La simbiosis se considera, por lo tanto, «parasexual».

En la línea evolutiva que conduce hasta nosotros se dan dos hechos diferenciados que en un principio no tuvieron relación causal entre ellos y acabaron ligados en un bucle retroactivo. Uno de estos acontecimientos fue la reducción en el número de cromosomas en el núcleo de las células hijas; el otro fue la fusión nuclear y celular. Ambos procesos fueron originariamente accidentes sin relación alguna entre sí y desligados de la reproducción.

Pero estos dos procesos acabaron enlazándose y, puesto que la fusión celular implica la mezcla de DNA de orígenes distintos en el tiempo y en el espacio, eso podría entenderse como una forma de sexualidad. Finalmente, esta manera especial de mezclar el material genético procedente precisamente de dos fuentes acabó enlazando con los mecanismos de la reproducción, llegando a aquella clase de reproducción en la que se parte de dos individuos distintos y que muchos consideran crucial para los últimos procesos evolutivos. Pero nosotros dudamos de que haya sido tan crucial. Es mucho más probable que los mismos vegetales y animales, con su complicada diferenciación en tejidos y formas de gran complejidad, se hayan mantenido por evolución. Y los organismos complejos parecen estar relacionados más directamente con la meiosis, con el DNA, el RNA y la síntesis de proteínas durante el apareamiento de los cromosomas en la división meiótica; su relación con el hecho de que se den dos tipos de células sexuales es sólo indirecta. La reproducción por medio de la sexualidad meiótica nos es necesaria sólo porque nuestros antiguos antepasados unicelulares sobrevivieron utilizando este sistema. Se encontraron atrapados en esta vía de tal manera que ya no pudieron volver a la reproducción asexual. Incapaces de nadar y dividirse a un tiempo, las células reproductoras de nuestros antepasados tuvieron que cargar con agregados celulares condenados a la muerte evolutiva. Pero al ser las células de los agregados las mismas que les proporcionaban las ventajas de un rápido desplazamiento en el agua, gran tamaño y mayor facilidad para la obtención de alimento, nuestros antepasados se vieron tan atrapados en la reproducción con dos sexos que pronto no pudieron ya prescindir de ella. Desde el principio, la esencia de la existencia animal implicaba la reproducción sexual. Pero la existencia de dos sexos en sí misma no se mantuvo nunca por selección natural. En realidad, cuando el proceso evolutivo puede llegar a evitar la existencia de dos sexos —la partenogénesis en las cucarachas, la clonación en el ser humano y cualquier otra vía— manteniendo al mismo

tiempo la complejidad del organismo pluricelular, lo hace sin titubeos. Biológicamente, la reproducción sexual sigue siendo una pérdida de tiempo y de energía.

En la vida sexual humana (y en la de los demás animales y vegetales) son necesarios dos pasos complementarios que son fundamentales para la reproducción. Primero, el número de cromosomas en algunas células ha de reducirse exactamente a la mitad por un proceso de división celular llamado meiosis que da lugar a óvulos o espermatozoides. En segundo lugar, estas células se encuentran y fusionan en el acto de la fecundación, lo que restablece el número normal de cromosomas en la célula recién formada, la cual empieza a dividirse para formar un nuevo individuo. Los géneros masculino y femenino fueron en realidad un refinamiento posterior; las primeras células germinales eran prácticamente idénticas, pero con el tiempo se diferenciaron en las pequeñas células espermáticas, muy móviles, y los óvulos, células estáticas de mayor tamaño. Esto añadió el problema de tener que reconocerse mutuamente para que se fusionaran. Actualmente han de cumplirse todas estas condiciones para que pueda formarse un nuevo individuo capaz de reproducirse sexualmente.

Pero en todo esto hay un enigma. ¿Por qué tienen que juntarse dos mitades para constituir un todo que volverá a formar dos mitades? Creemos que la meiosis, la creación sistemática de células haploides (células que tienen la mitad del número de cromosomas que es normal en las células del individuo que proviene directamente de la fecundación), fue promovida por aquella antigua amenaza para la vida que es el hambre.

Enfrentados al hambre, nuestros antepasados protistas no debieron de dudar en recurrir al canibalismo. En algunos casos la presa podría no haber sido digerida completamente, dejando así al organismo con una doble dotación de material genético o, lo que es lo mismo, en un estado «diploide», como se le denomina en biología celular. En otras palabras, después de comerse a una célula compañera, las dos células se fusionarían y lo mismo harían sus núcleos. Otra manera de crear un núcleo diploide antes de la evolución de la fecundación habría sido que los núcleos se dividieran con anterioridad al resto de la célula y luego volviesen a unirse si el resto de la célula no seguía la división. Todavía hoy muchas células no pueden realizar la mitosis de manera directa. Muchos microscopistas han sido testigos de errores cometidos por las células; empezar a formar dos núcleos por división y luego fusionarse de nuevo los dos núcleos resultantes. La diploidía accidental ya sea producto de la fusión con lo que era alimento en potencia o con parte de la misma célula, debe de haber ocurrido siempre en el macrocosmos.

Cualquiera que fuera su causa, la diploidía fue en su origen una condición monstruosa y anormal. Para liberarse de la carga que les representaba, las células afectadas tuvieron que ingeniárselas para hacer el proceso reversible; para ello legaban a sus células hijas sólo la mitad del material genético cuando se dividían. Esto significaba una nueva elaboración del proceso normal de mitosis en que se originan nuevas células con el mismo número de cromosomas que sus progenitores. Significaba adoptar el proceso de *meiosis*, en que sólo la mitad de los genes paternos, una sola dotación de cromosomas, pasaba a los individuos de la siguiente generación.

En la meiosis moderna, los cromosomas idénticos de cada una de las dotaciones se disponen alineados a lo largo del centro del huso. Si la célula se dividiese en ese momento y cada nueva célula tomase la mitad de los cromosomas, se obtendrían dos células separadas, cada una de ellas con una dotación cromosómica. Pero antes de la división, los cromosomas de cada dotación se duplican, resultando dos dotaciones que se sitúan a lo largo una junto a la otra. Es entonces cuando la célula se divide.

Los cinetocoros que mantienen unidos cada par de cromosomas pueden marchar al ritmo que les marca su tambor espiroquetal. Aún no están preparados para dividirse, de manera que, cuando la célula lo hace, los cromosomas que van con cada mitad siguen aparejados. Finalmente, se dividen en cada una de las células resultantes dejando sueltos los pares de cro-

mosomas y llevando las células a una nueva división, a partir de la cual se tendrán cuatro células con una dotación cromosómica cada una.

Es muy probable que en distintas líneas de protistas se hayan repetido millones de veces experimentos en este sentido, dando como resultado la muerte de la mayor parte de las células que tuviesen el número de cromosomas disminuido, al no poder producir todas las proteínas necesarias para sobrevivir. Unos organismos hinchados a causa del canibalismo, intentando liberarse de su duplicación, no podían desprenderse de ningún gen que les fuera necesario, ya que ello les representaría la muerte. Sin embargo, aquellos que redujeron su dotación genética justamente a la mitad volvieron a su condición haploide original de una sola dotación cromosómica. Bajo determinadas condiciones, como en una situación de sequía extremada, las posibilidades de sobrevivir eran mayores en los casos de dotación cromosómica doble. No obstante, en los momentos de crecimiento activo y de búsqueda de alimento, era preferible el estado haploide original. Los ambientes en los que se daba alternancia de situaciones, como sequías cíclicas o zonas afectadas por las marcas, favorecían la alternancia de los estados haploide y diploide. Finalmente, algunos organismos descubrieron que, para mantenerse viables, tenían que pasar de la meiosis a la fusión celular. Esta conexión periódica entre las condiciones haploide y diploide iba acompañada de una capacidad especial para aumentar la complejidad.

Así empezó este extraño sistema de reproducción sexual. Todavía hoy las situaciones de hambre, sequía, oscuridad, carencia de sales de nitrógeno y otras son causa de fusiones canibalísticas en muchos protistas. A primera vista, la división del número de dotaciones cromosómicas, que tendrá que duplicarse posteriormente, parece una pérdida de tiempo. Pero a menudo este proceso es el único camino que lleva a la supervivencia y acaba quedando grabado, institucionalizado, como en una persona que aprende a ir a su casa dando un rodeo y toma siempre el mismo camino porque no se da cuenta de que hay otros por los que tardaría menos en llegar. En las células precursoras de los animales el aumento de complejidad

reforzó aquellos caminos inútiles y molestos que daban un rodeo. Entre aquellas células que pasaban de manera cíclica del estado fusionado al original se encontraban nuestros antepasados.

El hecho de que muchos protistas y casi todos los animales, hongos y vegetales posean algún tipo de sexualidad meiótica, hace pensar que la meiosis y la fecundación se desarrollaron pronto en la historia de las células nucleadas. Los primeros protistas que experimentaron canibalismo y una vuelta a la haploidía ya tenían establecido su propio sistema de mitosis espiroquetal. Cada nueva generación de protistas recibía una dotación completa de cromosomas cada vez que su célula precursora se dividía. Una mitosis correcta en cada línea evolutiva es condición previa para la meiosis.

Como ya había observado en 1947 L.R. Cleveland, catedrático de la Universidad de Harvard, un cambio en el cronometraje de la replicación de los cinetocoros cromosómicos fue todo lo que hizo falta para que se originara la meiosis a partir de la mitosis. Pero Cleveland, con su acento de Mississippi y sus maneras tan particulares, no logró nunca convencer a sus colegas de que había resuelto el problema de la sexualidad meiótica.

En el terreno de la biología es muy normal que se produzcan accidentes que cambian el sincronismo de los acontecimientos. El mismo Cleveland filmó una reproducción que produjo cuatro células en vez de dos, así como uniones de tres células. Era bien consciente de que aquella desviación en el comportamiento celular tenía más de normal que de anormal. A pesar de lo convincentes que son sus películas, artículos y toda su teoría sobre el origen de la sexualidad, en aquel momento sus colegas no estaban preparados para oír nada de aquello.

Cleveland filmó la fusión caníbal de unos protistas llamados hipermastiginos. En algunos casos pudo observar incluso la fusión de sus núcleos, aunque normalmente casi siempre morían a continuación. Aportó documentación de las variaciones que se daban en cuanto al momento de replicación de los cinetocoros, los «botones» que conectan los cromosomas con

los microtúbulos del huso mitótico. Aquella falta de sincronización también solía conducir a la muerte. Cleveland observó el número de cromosomas en células que crecían hasta hacerse exageradamente grandes. Reconoció la sexualidad meiótica como una serie de accidentes que acabaron unidos y entrelazados. Canibalismo, fusión de los núcleos, variaciones en la sincronización de la replicación de los orgánulos intracelulares y ciclos ambientales que favorecen la condición haploide y luego la diploide eran situaciones que conducían todas ellas a la muerte. Para sobrevivir se tuvo que seguir un camino complicado, que fue el de la sexualidad.

Como otros logros de la evolución, los organismos con reproducción sexual probablemente empezaron a proliferar cada vez más al interaccionar con el ambiente y evolucionar conjuntamente. Especies muy diferentes de organismos sexuados actuales han coevolucionado estrechamente. Hay una especie de madreselva que, para ser fecundada, necesita ser visitada por colibríes; las flores del ágave americana necesitan la visita nocturna de los murciélagos. Las flores de algunas especies de asclepiadáceas sirven de cobijo a las larvas de la mariposa *Danaus plexippus* cuando maduran.

La mayor parte de los organismos que se reproducen asexualmente, que pueden hacer buenas copias de sí mismos casi instantáneamente sin la preocupacion de tener que buscar pareja, siguen siendo más adecuados para muchos ambientes. Pero los organismos con reproducción sexual, quizá debido en parte a que suelen ser pluricelulares, necesitan más tiempo para reproducirse. Por eso los humanos, y todos aquellos organismos que son como nosotros, ocupamos un nicho ecológico que, en cuanto al tiempo, es muy distinto al de los organismos no meióticos, como pueden ser las bacterias. El desarrollo individual lleva más tiempo y puede ser más adecuado para determinadas condiciones que cambian de manera cíclica. Además, como los animales complejos llevan a cabo un programa de desarrollo también complejo desde el momento de su concepción, cuando se fusionan el espermatozoide y el óvulo, poseen aptitudes especiales para la identidad y la muerte. Guardan sus genes potencialmente inmortales en la forma escindida de espermatozoides y óvulos, pero en cada generación esas células se unen y reproducen para formar un cuerpo de más células; un cuerpo individual que morirá, normalmente después de haber cumplido la misión que nadie le había solicitado de ser vehículo para la propagación de lo que aún son esencialmente microorganismos. Mortalidad e identidad no dependen tanto del complemento de los diferentes genes que obtenemos de nuestros padres como del mismo proceso de la meiosis. Proceso que puede asegurar que, como mínimo, una copia de cada uno de los genes importantes será distribuido a la siguiente generación. Estudios llevados a cabo con ciliados muestran que una identidad compleja no se mantiene por la incorporación de nuevos genes, sino por medio de la meiosis: las células de ciliados que se autofecundan originan un individuo que es tan viable como uno que consiga sus genes a partir de un miembro del sexo opuesto. De manera semejante, los animales partenogenéticos no necesitan pareja. Pero han de realizar la meiosis.

Normalmente se tiende a considerar sexualidad y reproducción como intrínsecamente unidas. Ayuda a restablecer la perspectiva el recuerdo de que los tres componentes de la reproducción sexual que en la actualidad se dan conjuntamente estuvieron separados hace mucho tiempo. La reducción del número de cromosomas, la fusión de dos núcleos de distinto origen y la unión de estos procesos, que se da de manera cíclica en la reproducción sexual de individuos complejos, son en realidad tres procesos distintos, como mínimo. Cada uno de esos pasos es en sí mismo independiente y cada uno de ellos se ha observado por derecho propio. L.R. Cleveland dejó constancia de la fusión de los núcleos de dos hipermastiginos que se habían fecundado mutuamente. También es normal que se den variaciones en el momento de la replicación de los cinetocoros, las estructuras que mantienen unidas las cromátidas y que podrían ser otro vestigio de sistemas de motilidad espiroquetales. Han sido descritas muchas veces especies que poseen una sola dotación cromosómica pero que, en determinadas circunstancias ambientales, recurren a la duplicación del número de cromosomas. La meiosis o reducción cromosómica

y la necesidad complementaria de fecundación evolucionaron en los protistas hace quizá 1200 millones de años. La conexión entre fecundación y formación del embrión surgió en los mamíferos hace tan sólo 225 millones de años. Por lo tanto, todos los pasos que conducen a nuestro tipo de sexualidad (canibalismo y fusión de los núcleos, desincronización de varios orgánulos intracelulares y cambios ambientales de tipo cíclico que favorecían de manera alterna la haploidía y la diploidía) resultan entrelazados en el origen de los organismos eucariotas pluricelulares.

Los biólogos han creído hasta ahora que la sexualidad persiste porque produce un aumento de la variedad, de la novedad en la siguiente generación. Se razona que esta variedad permite a los organismos con reproducción sexual adaptarse a los ambientes variables más rápidamente de lo que lo hacen aquellos que se reproducen asexualmente. Sin embargo, no hay pruebas de que esto sea cierto. Cuando se probó la hipótesis comparando animales que pueden reproducirse de ambas maneras, como los rotíferos y las lagartijas de reproducción asexual, los científicos hallaron que, al variar el medio ambiente, las formas asexuadas eran tan frecuentes, o incluso más, que las equivalentes sexuadas. Las hembras, tanto en rotíferos como en lagartijas, producen huevos fértiles de los que se desarrollan hembras adultas capaces de producir más huevos fértiles. No se han visto machos y, sin embargo, las poblaciones de estos rotíferos y lagartijas abundan en individuos variados bien adaptados a las exigencias de su entorno.

Otra teoría mantiene que la sexualidad es importante como mecanismo de rejuvenecimiento genético. Esta teoría se basa en la observación de que los paramecios producidos por división asexual viven sólo unos meses, mientras que las cepas que se conjugan sexualmente sobreviven indefinidamente. Pero existe un tipo de paramecio que da al traste con esta teoría.

Paramecium aurelia posee un gran macronúcleo y un pequeño micronúcleo. El enorme macronúcleo con miles de copias de genes hace normalmente todo el trabajo, fabricando RNA mensajero, mientras que el pequeño micronúcleo no hace nada. Pero cuando el paramecio está a punto para la conjugación y no encuentra pareja para ello, entonces tiene lugar un fenómeno llamado autogamia. El micronúcleo diploide se divide dos veces meióticamente, de lo que resultan cuatro micronúcleos haploides. Entonces, con un estilo que resulta típicamente absurdo en la naturaleza, mueren todos los micronúcleos excepto uno. Este último se divide de nuevo, esta vez por medio de una simple mitosis, y produce dos micronúcleos con dotaciones genéticas exactas.

Si en esta fase se presenta una posible pareja sexual, se produce la conjugación y uno de los dos micronúcleos pasa a la otra célula, intercambiándolo por uno de los de aquélla. El micronúcleo nuevo y el viejo se fusionan y así queda completado el ciclo vital. Pero si no se encuentra pareja disponible, los dos núcleos haploides, genéticamente idénticos, se fusionan uno con otro dentro de la misma célula. El paramecio acaba con un macronúcleo y con un micronúcleo, pero sin haber experimentado sexualidad de ningún tipo. En esta autofecundación no ha habido aporte de genes nuevos. No obstante, el protista se encuentra genéticamente recargado y rejuvenecido, capaz de reproducirse de nuevo durante generaciones.

En resumen, nuestro tipo meiótico de sexualidad no es un proceso tan espléndido como creemos. En realidad, para la biosfera es menos importante que la sexualidad bacteriana, que es una estrategia para la supervivencia inmediata por medio de la cual los microorganismos reciben nuevos componentes genéticos con tanta facilidad como nosotros pillamos un resfriado. Naturalmente, el ciclo vital de *Paramecium aurelia* demuestra que lo que ayuda al paramecio a sobrevivir no es el recibir genes de un macho y de una hembra —en otras palabras, la reproducción sexual—, sino la misma meiosis. Creemos que la meiosis como proceso celular fue necesaria para la evolución de los animales complejos. Incluso la clonacion cuidadosa de simples células produce una nueva generación de alta variabilidad. Considerando esto, parecería dudoso que el ciclo sexual meiótico se haya mantenido en organismos complejos debido al hecho de que añade variabilidad. Lo cierto es

que, habiendo tantas vías para llegar a la variación intracelular (algunas seguramente debidas a la cooperación de antiguos simbiontes), los organismos de gran complejidad necesitan una manera de asegurarse de que no van a quedar ahogados por ella. Lejos de ser una manera de añadir variación, la meiosis probablemente represente un mecanismo de estabilización.

La meiosis, especialmente la fase que implica el emparejamiento longitudinal de los cromosomas y una síntesis especial de DNA, RNA y proteínas, creemos que es algo como pasar lista o hacer un inventario. Sirve para asegurar que todas las dotaciones genéticas, incluyendo las de mitocondrias y plástidos, son correctas antes de la multiplicación celular con que se inicia el desarrollo embrionario. Después de todo, animales y vegetales regresan, en cada generación, a la fase unicelular.

La sexualidad, al igual que la simbiosis, es una expresión de un fenómeno universal: el principio del matrimonio mixto. Dos organismos, sistemas u objetos bien adaptados y desarrollados se combinan, reaccionan, se desarrollan de nuevo, se redefinen y se readaptan. Y de todo ello surge algo nuevo. Los inventos humanos explotan continuamente este mezclar y combinar. Por ejemplo, los sencillos relojes de pulsera unen la idea de reloj y de pulsera, los tanques son una unión de camión y cañón, los sintetizadores combinan ordenadores y pianos, y los aviones de despegue vertical poseen características del helicóptero y el aeroplano. Ya sea expresado como una infección vírica, como la unión de un alga y un hongo para formar un liquen, el canibalismo de las amebas, un matrimonio entre dos personas o la fusión de una televisión con una grabadora para hacer un aparato de vídeo, el principio de recombinación impregna toda forma de vida en la Tierra. Sin embargo, es la reproducción, y no la recombinación en el sentido estricto de sexualidad meiótica, la que lleva la voz cantante.

Los seres humanos estamos obsesionados por la sexualidad porque encontramos placer cuando nos abandonamos a ella. Pero más allá de las escenas de sexo subyace el imperativo

celular de la reproducción. Es la reproducción y no la relación sexual *per se* lo que se estimula realmente con esta forma de retroacción positiva: la repetición de experiencias agradables puede llevar a la mezcla y combinación de genes, pero sólo porque esta excursión secundaria es necesaria actualmente para la reproducción de los mamíferos. Si se desarrollasen «cortocircuitos» como la clonación, que evitaran la reproducción a partir de dos individuos sexualmente distintos y que estuvieran acompañados de efectos retroactivos lo suficientemente agradables, los animales complejos los aprovecharían reproduciéndose más rápidamente mientras que seguirían exhibiendo mucha variación. Lo cierto es que los animales clonados mostrarían probablemente tanta variación que necesitarían el estrafalario papel del apareamiento cromosómico de la meiosis aunque no fuera más que para mantener controlada dicha variación.

11
Ultimas eclosiones: animales y plantas



El animal más primitivo que existe en la actualidad, *Trichoplax,* fue descubierto en 1965 arrastrándose por un rincón de un acuario en Filadelfia. *Trichoplax* es poco más que un amasijo de células nucleadas desplazándose por medio de flagelos celulares con la estructura microtubular 9+2. No se han identificado antepasados de *Trichoplax.* Hemos de considerarlo un animal ya que se reproduce por medio de un óvulo que es fecundado por una célula espermática, formándose, a continuación, una esfera embrional de células. Pero eso es todo lo que tiene en común con los animales; carece de cabeza, cola y lado izquierdo y derecho. Superficialmente, este pequeño organismo que se desplaza arrastrándose no es más complejo que una ameba multicelular.

Cuando un protista con flagelos celulares se adhirió por primera vez a otra célula y le proporcionó el impulso necesario para desplazarse, de manera que los microtúbulos de la segunda célula pudieron ser utilizados para otros usos, se puso en marcha la línea evolutiva que llevó hasta los animales. Este fue el inicio de la especialización celular, que en los animales ha alcanzado un nivel muy elevado. Algunas células se hicieron natatorias, otras conservaron su capacidad para la mitosis y la meiosis, y otras dedicaron su aparato espiroquetal a la percepción del mundo exterior. Las células de las antenas, las de los órganos del equilibrio, las del riñón, las cerebrales,

los receptores mecánicos y las células olfatorias de los animales no se reproducen nunca una vez alcanzada su madurez. Esto probablemente se deba a que los usos especiales a los cuales han dedicado sus microtúbulos excluyen su utilización para la formación del huso mitótico.

Los accidentes que hacen que las células hijas no se separen y permanezcan juntas o amalgamadas constituyen un caso bastante frecuente en la evolución. La pluricelularidad de un tipo u otro aparece muchas veces en muchos linajes de la vida, y lleva a organismos mayores y más complejos, que se basan en un plan celular reconocible. Las criaturas del microcosmos no tienen por qué ser todas unicelulares. Las mixobacterias, las cianobacterias y las actinobacterias son principalmente multicelulares. Los hongos son levaduras multicelulares y muchas algas verdes parece que sean *Chlamydomonas* multicelulares. Los animales y los vegetales no se caracterizan únicamente por el hecho de ser multicelulares.

Entre los protistas, la tendencia de las células hijas a mantenerse juntas llevó a la formación de amebas multicelulares, como los mixomicetes, algas protistas multicelulares, incluyendo laminarias y algas rojas, y coanoflagelados pluricelulares, como las esponjas. La pluricelularidad probablemente evolucionó una docena de veces por separado en las bacterias y más de cincuenta en los protistas. Tres tipos de organización protista alcanzaron tanto éxito en número y variación desde el punto de vista actual que los hemos elevado al alto rango de reinos: animales, hongos y vegetales.

Normalmente las células de un ser multicelular derivan de una única célula por clonación. Pero en algunos organismos (como los mixomicetes, las bacterias deslizantes y el ciliado *Sorogena*), se forman agregados de células de la misma especie pero de origen distinto. Ya sean clonadas o reunidas, las células se tocan, interaccionan sutilmente y forman empresas orquestadas, como pueden ser las estructuras arborescentes bacterianas, los pseudoplasmodios de los mixomicetes o la torre de esporas de *Sorogena.*

Cada uno de los cinco reinos (bacterias, protistas, hongos, plantas y animales) posee miembros multicelulares. Pero en

los primeros cuatro reinos (incluidos las plantas), los organismos multicelulares tienen sólo mínimas interconexiones entre sus células. En el reino *Animalia,* por el contrario, multicelularidad e interacción entre células llegaron a ser una habilidad. La organización multicelular de los animales es exquisitamente refinada y está muy organizada. La célula animal está altamente especializada y unida a sus vecinas por una variedad de elegantes conexiones intercelulares (septos, espacios vacíos, uniones estrechas y desmosomas, por citar sólo algunas). Son estas uniones, cuyas diferencias no se han hecho visibles hasta hace poco tiempo por medio del microscopio electrónico, las que determinan el grado y la calidad de comunicación entre las células. Además de la blástula, esa pelota de células que se convierte en el embrión, las marcas propias de la animalidad son las esotéricas uniones entre células.

Al principio de su desarrollo durante el eón Proterozoico, hace unos mil millones de años, los primeros animales debieron de distinguirse de la multitud de pegajosas colonias multicelulares de microorganismos por su aspecto. A través de la intensa interacción evolutiva en colonias estrechamente interconectadas, algunos grupos de células consiguieron un control y una coordinación mutuas tales que cuesta imaginar que provinieran de poblaciones mezcladas de microorganismos de distinto origen.

Los primeros antepasados algales de las plantas eran poco más que cadenas de células llenas de cloroplastos que formaban una masa filamentosa. Se sabe que hace unos 460 millones de años ya había esporas de plantas terrestres. (Compárese con la evolución más antigua de los animales, que se dio hace unos 700 millones de años, aunque no abandonaran el medio acuático hasta hace 425 millones de años.) Podemos averiguar los pasos probables de la evolución de células vegetales a partir de los antepasados algales observando la vida de las volvocáceas, un tipo de alga verde que crece en estanques. Cada célula de las volvocáceas tiene dos undulipodios 9+2, una

mancha ocular y un cloroplasto. Las células individuales de la colonia son descaradamente parecidas a las del protista *Chlamydomonas,* un alga unicelular. Cuatro células dispuestas juntas en un disco gelatinoso estable se reconocen como el organismo *Gonium sociale.* Con todo, cada célula de *Gonium sociale* puede irse nadando por su cuenta para empezar una nueva colonia.

Más complejas que *Gonium* son las especies intermedias, formas organizadas de algas coloniales que consisten en 16 o 32 células. La forma más organizada de todas es *Volvox,* una esfera hueca compuesta por medio millón de células. *Volvox* gira sobre su eje al nadar y, a diferencia de otras volvocáceas menos organizadas, sólo unas pocas células especializadas cerca del polo basal pueden dividirse para producir colonias de células hijas. Las células hijas se desprenden de su progenitora y se van hacia el hueco del interior, donde continúan dividiéndose y forman sus propias esferas multicelulares en miniatura. Finalmente, las esferas resultantes desprenden un enzima que disuelve el soporte gelatinoso de la esfera progenitora. Esta última se disgrega y las nuevas colonias salen al exterior. Aunque se trata de una reproducción asexual, algunas especies de *Volvox* poseen reproducción sexual. Unas elaboradas esferas translúcidas de color verde sueltan huevos o esperma; algunas esferas hermafroditas sueltan los dos tipos al mismo tiempo. Las células liberadas, que se parecen a los precursores de las algas verdes, se encuentran y se fusionan, empezando por sus undulipodios. Cuando la fecundación se ha completado, los undulipodios se retraen hacia el interior de las células fusionadas y empieza la meiosis, seguida por la mitosis. El resultado de todo esto es una multitud de células hijas que se adhieren entre sí, desarrollando nuevas colonias de *Volvox.*

Las algas crecían en aguas poco profundas e iluminadas por la luz solar. De vez en cuando esas zonas se secaban y las algas que podían mantener húmedo su interior mientras el exterior permanecía seco se encontraban en situación ventajosa desde el punto de vista evolutivo. Sobrevivieron y se multiplicaron para convertirse en los primeros vegetales: formas que

apenas se alzaban del suelo, sin tallos ni hojas, parecidas a los modernos musgos y hepáticas, que no podían soportar su propio peso fuera del agua. Las algas se convirtieron en plantas terrestres conservando el agua en su interior. Estas plantas primitivas requerían un medio acuoso para que sus células espermáticas de dos colas pudiesen nadar al encuentro de los huevos. La formación de embriones a partir de huevos fecundados en el interior de una cubierta de tejido paterno hacía de ellas plantas verdaderas, diferenciándolas de las colonias de algas protistas.

El suelo seco era un ambiente tan hostil para las plantas como la Luna lo es para nosotros. Para los tejidos gelatinosos de las plantas era crucial no colapsar o secarse. Hacerse terrestre significaba desarrollar una dura estructura tridimensional completamente distinta de las primeras formas que permanecían recostadas sobre el suelo. Al usar el oxígeno de la atmósfera (el viejo producto residual de las cianobacterias), las plantas primitivas desarrollaron un material para la pared celular llamado lignina. Esta lignina, combinada con la celulosa, es lo que da fuerza y flexibilidad a árboles y arbustos. Esa robustez llevó al desarrollo del llamado sistema vascular que transportaba el agua elevándola desde las raíces y haciendo descender los nutrientes desde los extremos de las ramas que se habían aplanado formando las hojas primitivas. Las nuevas plantas vasculares diferían también de sus predecesoras por tener dos juegos de cromosomas en sus células en vez de uno.

Cuando el microcosmos se expandió dando origen al macrocosmos en forma de hermosas plantas, los microorganismos invisibles se encontraban por todas partes. La resistencia a la sequía, la producción de lignina y la conquista del suelo probablemente implicaron simbiosis microbianas.

K. Pyrozinski y D. Malloch, biólogos canadienses, creen que los vegetales se formaron a partir de simbiosis entre algas y hongos. Según estos científicos, eran como líquenes al revés: en las simbiosis que condujeron hasta los vegetales, la parte dominante era el alga en vez del hongo. Quizá no sea coincidencia que el 95 por ciento de las plantas terrestres actuales posean hongos simbióticos en sus raíces, llamados micorrizas. Muchas plantas se marchitarían y morirían si se las privase de esos hongos en el suelo (La mayor parte del 5 por ciento de plantas que carecen de hongos simbióticos persistentes han vuelto de nuevo al agua y son plantas acuáticas). La verdad es que la difícil conquista de la tierra seca se comprende mejor considerándola como obra de simbiontes, compañeros que colaboran unos con otros para hacer juntos lo que ninguno de los dos podría hacer por separado. Y la evolución discontinua a partir de algas húmedas y blandas hacia plantas terrestres lignificadas sugiere de nuevo la existencia de simbiosis.

Hace 400 millones de años, cuando los primeros peces con mandíbulas deambulaban por tierra y era la época de los primeros insectos ápteros, las plantas vasculares ya eran muy abundantes. La falta de agua fue un reto crucial para el nuevo ambiente terrestre. El desarrollo de semillas fue una solución. La semilla duradera permite al embrión de la planta esperar el mejor momento para su desarrollo. Se puede apreciar el invento imaginando una estructura semejante para los mamíferos. Imaginemos que los cigotos humanos estuvieran envueltos en cápsulas protectoras capaces de deshacerse en un momento dado y que se activasen sólo por una próspera economía en tiempo de paz. Qué cómodo sería para una alocada joven poder recoger y guardar a sus futuros hijos, a la espera de haber acabado los estudios, comprarse una casa y en general, asegurarse el futuro, para hacerlos germinar. Las semillas permitían a las plantas en embrión esperar y controlar calladamente el ambiente hasta que se daban las condiciones favorables. La fecundación y desarrollo en el interior de los tejidos húmedos del progenitor permitía a las semillas de las plantas prosperar a pesar de la inestabilidad de las lluvias.

Los primeros bosques estaban formados por gigantescos «helechos con semillas». Eran árboles con aspecto de exuberantes helechos que, a diferencia de los helechos verdaderos, producían semillas. A lo largo de más de cien millones de años, desde 345 hasta 225 millones de años atrás, durante el tiempo de la evolución de los insectos alados, los calamares en forma de torpedo y los dinosaurios (entre otros), los hele-

chos con semillas crecieron ufanos con un esplendor tropical. Formando bosques de grandes árboles, que no eran ni verdaderos helechos ni plantas con flor, sino cicadofitinos, un grupo con entidad propia, los helechos con semillas, se esparcieron por vastas extensiones de tierra. Se cimbreaban movidos por cálidos vientos desde el extremo sur de Gondwana hasta las colinas onduladas de Laurasia. De vez en cuando desaparecían hacia el interior de la Tierra en el desplazamiento de los continentes y así formaron la base material para los yacimientos de carbón más ricos del mundo.

Hace unos 225 millones de años, los helechos con semillas fueron reemplazados por sus descendientes, las coníferas, o plantas portadoras de conos, que fueron alimento principal de algunos de los primeros dinosaurios vegetarianos. Las plantas portadoras de conos, como los actuales pinos y abetos, probablemente fueron más resistentes que los gigantescos helechos con semillas debido a su mayor tolerancia al frío. Se cree que en los glaciares que aparecieron en varios continentes hace 225 millones de años crecían coníferas con oportunidades adaptativas. Los helechos con semillas y otras plantas que dejaron sus huellas en el carbón eran en gran parte tropicales. Sus semillas desnudas no se encontraban encerradas en ningún tipo de fruto y debieron de ser, por lo tanto, muy sensibles al frío. No resistieron los largos inviernos de las épocas de glaciación. Sin embargo, para muchas especies de coníferas, como las actuales de hoja perenne, las temperaturas por debajo de cero no fueron un problema demasiado importante. Con una red microcósmica de hongos en sus raíces (asomando a veces como setas), los antiguos árboles de hoja perenne se expandieron también hacia las regiones prohibidas de las alturas alpinas y hacia las latitudes extremas donde abundaban las ventiscas.

Los sucesores de las coníferas que toleraban el frío eran plantas con flores. Eran descendientes de las mismas plantas terrestres primitivas que también originaron los helechos con semillas. A juzgar por determinados fósiles de plantas parecidas a las palmeras, hace 123 millones de años ya habían evolucionado y poco después, hace unos 114 millones de años,

ya se habían esparcido por todos los rincones del planeta. Las fanerógamas, la manifestación de los cloroplastos que más éxito ha conseguido en la Tierra, coevolucionaron con los animales desde el principio. El ramillete que ofrece el pretendiente a su chica es tan sólo una manifestación reciente de esta antigua intimidad. Los insectos se multiplicaron en el néctar dulce y recibieron otras compensaciones por parte de las flores a cambio de sus servicios para llevar a cabo la polinización cruzada. Pájaros y mamíferos detuvieron parte del crecimiento cada vez mayor de las fanerógamas al comerse sus frutos y hojas. Pero las plantas con flor o angiospermas se defendieron desarrollando toxinas moleculares y alucinógenos para protegerse contra los animales, además de desarrollar frutos duros (los llamados frutos secos) y semillas también fuertes (pepitas) para proteger a su embrión de la digestión animal. Un efecto colateral de estas medidas fue un efectivo sistema de distribución animal para los embriones de angiospermas que iban encerrados en una cubierta.

Puede que no sea coincidencia que los primeros mamíferos, animales de sangre caliente ponedores de huevos, y los pequeños marsupiales se remonten casi exactamente al período de las primeras flores, evolucionando hace unos 125 millones de años. Muy perspicaces, los mamíferos vegetarianos proporcionan otro ejemplo sorprendente de cooperación en la evolución, ya que el interés que sentían por los alimentos vegetales probablemente les llevó a convertirse en diseminadores de semillas de angiospermas bien alimentados. Los frutos sin semillas de algunas plantas con flor, como el platanero y el naranjo, poseen la estrategia de dispersión más notable: estación tras estación los cultivadores humanos los clonan. Las plantas son perpetuadas asexualmente debido a su buen sabor. Los vegetales, establecidos en tierra antes que nosotros, los animales, parecen muy expertos en seducirnos y han logrado convencernos para que hagamos por ellos una de las pocas cosas que nosotros podemos hacer y ellos no: moverse.

La estructura de los vegetales parece excluir su evolución hacia un comportamiento complejo. Sin embargo, al contemplar el impresionante registro que de ellos se conserva, pode-

mos empezar a sospechar que son algo menos indefensos de lo que parecen. Nuestro sistema nervioso central y nuestro cerebro evolucionaron como una adaptación para comer vegetales y para comer a los consumidores de vegetales. Las plantas no necesitan en absoluto de cerebro: toman prestado el nuestro. Poseen una inteligencia estratégica que reside más en la química de la fotosíntesis y en las estratagemas de los genes que en las maniobras de la corteza cerebral; nosotros actuamos por ellos. Y ¿qué hay más allá de esta sabiduría diferente de las plantas? No hay nada más ni nada menos que el antiguo microcosmos. Los microorganismos, en forma de cloroplastos, mitocondrias y los restos turbulentos de los sistemas de motilidad espiroquetal, proporcionan la base para el éxito de los vegetales.

Los animales afrontaron el paso del medio acuático al medio terrestre de manera algo diferente. Quizá debido a su patrimonio más pobre —poseen sólo mitocondrias y los sistemas espiroquetales, pero no cloroplastos— les costó 35 millones más de años que a los vegetales alcanzar el medio terrestre, aunque habían evolucionado antes que ellos.

Al carecer de partes duras, los primeros animales verdaderos se conservan sólo de manera limitada, como impresiones de todo el cuerpo en rocas conglomeradas; al ser atrapados hace mucho tiempo en playas arenosas, fueron enterrados antes de que pudieran ser consumidos por decididas bacterias. Estos primeros animales produjeron formas globulares y con aspecto de gusano que eran cada vez más largas y contenían aún más células, que permanecían unidas aún más tiempo después de la división. Se explotaron nuevas estratagemas para la supervivencia. Algunas, por ejemplo, utilizaban sus flagelos celulares 9+2 como cilios para arrastrar partículas de nutrientes, bacterias y pequeños protistas hacia su tracto intestinal. Con el tiempo, a partir de las blástulas se desarrollaron animales mayores y más hábiles en la búsqueda de nutrientes. Algunos fueron probablemente importantes arquitectos del moderno paisaje viviente. En términos humanos, aquellos animales aún no eran grandes. Sin embargo, unidos en comunidades, construyeron enormes arrecifes coralinos, mientras otros se reunían a comer en los suaves tapetes microbianos que se diseminaron durante la Edad de las Bacterias. Actualmente sólo se encuentran tapetes microbianos en zonas aisladas y remotas de la Tierra no favorables para los eucariontes, como ambientes extremadamente salados o la zona intermareal. (Esos rincones del océano a salvo de la acción de caracoles en busca de alimento, gusanos destructores o constructores de viviendas son un reducto importante de los más antiguos habitantes del planeta.)

Las primeras huellas dejadas en rocas conglomeradas por los animales más antiguos de los que tenemos noticia directa se encontraron en las colinas de Ediacara, cerca de Sidney, en el sudeste de Australia. Con el nombre de *fauna de Ediacara* se conocen también los animales fósiles de cuerpo blando similares a los mencionados y con una antigüedad de 700 millones de años, hallados en diversas zonas del planeta. Algunos tipos animales que han tenido mucho éxito ya están presentes en los restos de Ediacara. Los tipos más importantes que evolucionaron a partir de los primitivos animales de la fauna de Ediacara y sus parientes próximos fueron, en el hemisferio sur, los gusanos blandos y segmentados llamados anélidos. Sería discutible la presencia en los fósiles de Ediacara de restos de los artrópodos que tanto éxito alcanzaron (antepasados de muchos animales segmentados con esqueleto externo, incluyendo trilobites, cangrejos, langostinos, cucarachas y langostas). Posiblemente eran celentéreos que inoculaban a sus presas el veneno de sus tentáculos y ctenóforos dotados de undulipodios muy desarrollados que alcanzaban casi tres milímetros de longitud. Muchos animales extinguidos en la actualidad estaban presentes en la fauna de Ediacara.

Otros grupos importantes de animales sin esqueleto, como los equinodermos (el tipo al que pertenecen estrellas y erizos de mar) pueden haber existido hace ya 700 millones de años. Pero al carecer de partes duras, es difícil asegurarles una antigüedad superior a los 560 millones de años. No obstante, tenemos la suerte de que muchas formas de cuerpo blando se

hayan conservado muy bien en medio de la violencia y el tumulto de la historia geológica. Martin Glaessner, profesor de geología en la Universidad de Sidney (Australia), fue el primero que despertó la atención del mundo científico por la fauna de Ediacara, ese hallazgo sensacional, tan emocionante como pueda ser encontrar ruinas en un desierto barrido por el viento o encontrar por casualidad antiguos templos Khmer en la selva de Camboya. Ahora comprendemos con mucha más claridad el enorme «retraso» en la aparición de fósiles de formas animales. Animales blandos de gran complejidad precedieron a los animales con partes duras, de la misma manera que hombres con el cuerpo descubierto y que construían artefactos de gran complejidad precedieron a los caballeros armados de cubierta dura. Los primeros animales —reducidas sociedades de células, bestias esponjosas y formas primitivas parecidas a *Trichoplax* y bastante menos complicadas que los animales de Ediacara— no debieron de llegar nunca a fosilizarse. Los descendientes de comunidades de animales primitivos como *Trichoplax*, tienen tanta agua en su composición y son tan delicados y escasos, pasando generalmente tan desapercibidos, que aún hoy su estudio resulta difícil. Los animales primitivos, al carecer de partes duras o esqueleto interno, como la mayoría de protistas, se desintegraban completamente al morir. Sin embargo, sus descendientes estructurados convirtieron el yeso y sílice en vistosas conchas y esqueletos, dejando para la posteridad gran cantidad de pistas sobre la vida primitiva en nuestro eón Fanerozoico.

El inicio del periodo Cámbrico, hace unos 580 millones de años, representa la llegada de la era moderna, el eón Fanerozoico en que vivimos. En el Cámbrico se da tanta abundancia de fósiles y son tan claros que durante mucho tiempo se creyó que la vida había empezado entonces. Hasta que no se reveló el microcosmos fósil, a lo largo de los últimos veinte años, las rocas más antiguas se agrupaban en un enigmático y enorme periodo de tiempo llamado Precámbrico, que se extendía hasta los orígenes de la Tierra. Hoy sabemos que la vida no empezó con los trilobites y animales semejantes bien desarrollados del Fanerozoico. Lo que empezó en el

moderno eón Fanerozoico fue el desarrollo de esqueletos, conchas, cubiertas rígidas y otras partes duras para preservarse de las olas y de los depredadores, lo que tuvo como efecto secundario que quedase un claro registro fósil de aquellos animales.

Muchos naturalistas europeos de los siglos XVIII y XIX llamaban «piedras con figuras» a determinados fósiles que presentaban dibujos complicados. Algunos los consideraban una prueba de la salida de la superficie de «formas» animales que se producían de manera continua bajo tierra, mientras que otros sugerían que debían de remontarse a la época del Diluvio. John Woodward, profesor de física en el Gresham College de Londres, por ejemplo, pensaba que a partir de los fósiles vegetales ingleses se podía calcular en qué época del año se produjo el Diluvio. Como escribió en 1695: «... de todas las diversas Hojas que ya he observado, de ese modo alojadas en Piedra, no he observado ninguna en ningún otro Estado, ni Frutos más avanzados en su Crecimiento, y hacia la maduración, de lo que se esperaría que estuvieran al Final de la estación Primaveral». «Los Conos de los Pinos», decía en otro de sus trabajos, «se hallan en su Estado invernal, como asimismo se encuentran todas las Verduras de huerta y las conchas jóvenes. El Diluvio llegó, poniendo fin a su posterior crecimiento, a finales de mayo». Bien adentrado el siglo XVIII, los fósiles, de la naturaleza que fuesen, eran interpretados en un contexto bíblico y estudiados buscando sólo la verificación de la palabra de Dios. Pero el naturalista francés Georges Louis Leclerc de Buffon, el británico Erasmus Darwin (abuelo de Charles Darwin) y, más tarde, el evolucionista francés Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet de Lamarck, el autor y artista inglés Samuel Butler y otros habían empezado ya a pensar en esas rocas de manera diferente. El editor de la enciclopedia de Londres, Robert Chambers, en su obra *Vestigios de la Historia Natural de la Creación,* publicada en 1844, avanzó, de manera anónima, la idea de que Dios no creó las especies por separado y las controlaba activamente, sino que creó la vida en la Tierra sólo una vez, al principio, y dejó que siguiera su curso vital.

Las nuevas ideas sobre la vida causaron un cambio en las ideas sobre Dios. Charles Darwin, un hombre que al principio escribió que «no tenía ninguna duda sobre la verdad estricta y literal de la Biblia», se preguntaba más tarde «cómo podía un Dios bienhechor haber deseado que los icneumónidos destrozaran a su presa». En 1844 Darwin escribía a su colega, el botánico Joseph Hooker: «Como mínimo se vislumbra algo de luz y estoy casi convencido (de manera contraria a la primera opinión que tuve sobre el particular) de que las especies no son (es como confesar un crimen) inmutables.[43] Cuando la teoría de la evolución biológica se extendió, a finales del siglo XIX, los fósiles cámbricos se interpretaron a veces como representantes de la primera creación general hecha por Dios, la de las llamadas formas de vida más bajas. Sin embargo, con el descubrimiento de los fósiles de bacterias, protistas y la fauna de Ediacara se ha visto claramente que la aparición súbita de la vida en las rocas cámbricas era una ilusión relacionada con la formación de cubiertas exteriores duras en los animales de aquel tiempo. Nuestros antepasados habían estado rondando por la Tierra durante 3000 millones de años antes de que empezasen a formar conchas y esqueletos externos visibles a simple vista.

Las primeras partes duras de los animales, que datan de hace unos 580 millones de años, estaban formadas de fosfato cálcico y de la sustancia orgánica llamada quitina. La quitina fue utilizada por los trilobites y por otra línea de artrópodos cámbricos predominantes, los euriptéridos. Estos últimos eran gigantescos «escorpiones de mar» que a veces alcanzaban más de tres metros de longitud y que actualmente están totalmente extinguidos. Otras formas cámbricas incluían los braquiópodos, criaturas muy parecidas a las almejas. Casi todos los braquiópodos están extinguidos, pero algunos de esos antiguos moluscos aún pueden ser vistos por los buceadores a lo largo de la costa atlántica de Norteamérica.

Quizá los más famosos fósiles cámbricos sean los de Burgess Shale, hallados por el geólogo Charles Walcott en 1910 cerca de Field, en la Columbia Británica. Walcott reunió un equipo para dinamitar la zona y descubrió aproximadamente

un metro de pizarra extremadamente fosilífera que había constituido las capas fangosas de un mar extinguido hacía tiempo. Actualmente, las últimas capas se encuentran elevadas en un paso montañoso en las Cascades, una cadena de montañas que se extiende desde los estados de Washington y Oregón hasta el oeste de Canadá. En la siguiente década, Walcott y sus colegas consiguieron unos 35 000 fósiles, muchos de los cuales se encuentran ahora en la Smithsonian Institution de Washington.

Casi todos los fósiles cámbricos pertenecen a uno u otro de la treintena de tipos zoológicos conocidos en los que se encuadra a los animales actuales. En la literatura paleontológica quedan unos pocos casos enigmáticos (a menudo con la etiqueta científica de «problemático») y están descritos sin clasificación.

Un grupo de fósiles muy disperso que se ha encontrado en gran abundancia en rocas que van desde el bajo Cámbrico hasta principios del mismo lo constituyen los arqueociátidos, que son estructuras esqueléticas en forma de cono. Los mares tropicales estaban dominados por extensas comunidades de estos organismos. Estos seres coniformes de consistencia pétrea no se encuentran en ninguna otra forma en la actualidad y la especulación, tal como suele ocurrir en un campo en el que se carece de información, corre rápidamente. ¿Eran parecidos al coral o a las esponjas? ¿puede que no fueran ni siquiera animales? Fuesen lo que fuesen, los arqueociátidos desaparecieron de manera brusca en el Cámbrico más reciente. Todas sus numerosas familias, especies y géneros acabaron extinguiéndose algo antes de cumplirse los 80 millones de años desde su aparición. Se conocen fósiles de este grupo en Inglaterra, Siberia, Canadá y otras zonas.

Se conocen otros ejemplos de despilfarro biológico, de especies fantasmas de las que se tiene poco más que un incompleto registro fósil. Unas «cosas» con aspecto de minúsculos diseños grabados en piedra caliza se conocen bajo el nombre de estromatoporoideos. Aparecen a finales del periodo Cámbrico y persisten a lo largo de casi todo el Paleozoico, y al menos un paleontólogo declara que eran vastas extensiones de cianobacterias. Otros creen que se trataba de comunidades

de esponjas o de animales parecidos a esponjas. Es decir, nadie sabe exactamente si estas problemáticas criaturas eran comunidades de microbios, animales o ninguna de las dos cosas.

Cualquiera que paseara a lo largo de las playas cámbricas y mirase hacia el océano en vez de hacerlo hacia los tapetes microbianos de poca altura anclados en tierra, no notaría mucha diferencia entre la fauna de hace 500 millones de años y la actual. Las pequeñas diferencias en las formas de vida marina no son más que un problema de esoterismo taxonómico. Aún más, determinados organismos, como *Limulus* (conocido como cacerola de las Molucas), no han cambiado mucho desde los tiempos del Cámbrico. Estos animales con aspecto de cangrejo son otra clase de artrópodos completamente distinta. Siguen viviendo en Cape Hatteras (Carolina del Norte) y en Cape Cod (Massachussets), con su prole distribuida a lo largo de la costa atlántica. Unidos por parejas en una prolongada cópula, desplazándose lentamente hacia el agua o recostados sobre el dorso agitando sus patas, la cacerola de las Molucas conserva el mismo aspecto que hace 400 millones de años.

Sin embargo, para el ojo estudioso y la mente receptiva, un baño en el mar cámbrico ofrecería sin duda delicias especiales; el submarinismo podría ser aún más emocionante. Cualquier especie encontrada, si se pudiese dar la vuelta al tiempo, sería diferente en sus detalles a las especies actuales. No existe ninguna especie del Cámbrico —y se conocen millares— que haya perdurado hasta la actualidad. Todas las formas que nos son familiares, como langostas, mejillones, ostras, almejas y cangrejos, estarían ausentes. No habría un solo pez. En cambio, abundarían comunidades de gusanos ondulantes, arqueociátidos con sombrero de brujo, misteriosos estromatoporoideos, arbustos de braquiópodos, corales solitarios y oscuras esponjas. Tipos enteros de seres marinos gigantescos, temblorosos y de aspecto globular puede que se multiplicaran en gran abundancia. Aquellas criaturas, constituidas completamente de partes blandas gelatinosas, no dejaron buenos fósiles. Al salir del agua, nuestro buceador del Cámbrico habría sido

testigo de la difícil lucha de aquella minoría de animales amenazados sorprendidos jadeando y secándose en la orilla; serían los antepasados de aquellos que se adaptarían a la vida terrestre.

En una mirada retrospectiva, la adaptación de los animales a la vida en tierra puede contemplarse como un problema de ingeniería de proporciones desalentadoras, comparable en su complejidad a lo que representaría para el ser humano la vida en otro planeta. La vida terrestre tenía sus atractivos: se podía tomar oxígeno en abundancia del aire y la tierra misma proporcionaba una frontera para la expansión. Pero también había obstáculos extraordinarios.

La emigración hacia tierra y la reproducción continuada en aquel medio requerían una serie de importantes cambios en todos los sistemas de órganos de los animales que conseguían llegar hasta allí. Apartados del medio acuoso flotante, los organismos se colapsaban bajo su propio peso y se necesitaban unos buenos músculos y una disposición vigorosa de los huesos para compensar la falta de flotación. También era imprescindible un equipo para la respiración que funcionase en el medio gaseoso: el oxígeno, que en el agua estaba presente en unas pocas partes por millón, ahora, en la atmósfera, aumentaba su concentración en varios centenares de veces. Además, para que los animales soportaran la violenta luz solar sin filtrar que incidía directamente sobre la superficie terrestre se necesitaban cubiertas externas como pieles, cutículas y caparazones. Pero la mayor amenaza era la sequía. En tierra, la amenaza mortal de la desecación está siempre latente. Tenía que vencerse esa sed sofocante. Los organismos que no pudieron transportar agua con ellos de alguna manera, al dejar el medio acuático, se condenaron.

El traslado a tierra firme probablemente fue causado por levantamientos geológicos, por el periódico retroceso de las aguas en que vivían los animales. Lo cierto es que sólo unos pocos representantes del reino animal han conseguido adaptarse a la vida en el medio terrestre. No existe ningún tipo zoológico cuyos representantes sean todos terrestres. Los animales que hoy en día pueden completar todo su ciclo vital en

tierra firme son todos descendientes de alguno de los tres o cuatro grupos de animales acuáticos que llegaron hasta la orilla: algunos artrópodos, a saber, los insectos y los arañas; unos pocos moluscos, como los caracoles de tierra; algunos anélidos, y algunos miembros de nuestro tipo, los cordados. Los miembros de este último grupo poseen el sistema nervioso en forma tubular y situado hacia la parte posterior de su cuerpo, y siempre desarrollan hendiduras branquiales en algún momento de su ciclo vital, lo que es una prueba de su ascendencia oceánica. El de los cordados al cual nosotros pertenecemos es el de los vertebrados. De los otros más o menos treinta grupos de invertebrados, ni un solo miembro de ninguna especie sobrevive a lo largo de todo su ciclo vital confinado en tierra.

Naturalmente, muchos animales acuáticos se han ido abriendo camino hacia tierra. Pentastómidos y tenias, por ejemplo, que viven, respectivamente en la humedad de las cavidades nasales y del intestino de vertebrados, sólo han colonizado superficialmente esa tercera parte de la Tierra que es realmente «tierra», en oposición a océano. Incluso en las seis clases de cordados (peces óseos, peces cartilaginosos, anfibios, reptiles, aves y mamíferos), sólo las tres que han evolucionado más recientemente (reptiles, aves y mamíferos) han conseguido eliminar completamente la necesidad de estar sumergidos en agua en algún período de su vida.

Y entre aquellas especies actuales cuyos antepasados eran habitantes del océano y tenían partes duras, hay algunas que han regresado al medio marino. Los ictiosaurios, reptiles nadadores de la era Mesozoica, se adaptaron al medio terrestre y sólo posteriormente, sometidos a diferentes conjuntos de presiones de selección, regresaron al océano. Por tanto, las focas y leones marinos que admiramos en los acuarios en realidad no son más que «perros de agua». Muy diferentes de los peces desde el punto de vista evolutivo, los precursores de las focas, leones marinos, delfines y ballenas evolucionaron todos como criaturas terrestres provistas de cuatro patas. Todos los organismos terrestres derivamos, en última instancia, de antepasados acuáticos. La fecundación delata la existencia de un

antepasado común para todo animal viviente. El acto esencial de creación animal sigue realizándose en el agua. Procedentes del mar, de un río, estanque o de los mismos fluidos de los tejidos corporales, el espermatozoide y el óvulo siempre se encuentran en un medio húmedo.

En cierto modo, aquellas especies animales que se adaptaron completamente a la vida terrestre lo hicieron con trampa: llevándose con ellas su anterior medio ambiente. Ningún animal ha llegado a abandonar completamente el microcosmos acuático. La blástula y el embrión aún se desarrollan en las condiciones de humedad y flotación primitivas del útero. Cubiertas y revestimientos a prueba de agua encierran el medio primordial. Las concentraciones de sales en el agua de mar y en la sangre son, desde el punto de vista práctico, idénticas. Las proporciones de sodio, potasio y cloro en nuestros tejidos son misteriosamente semejantes a las que se dan en todos los océanos. Esas sales son compuestos que los animales llevaron con ellos en su peligroso periplo hacia tierra. No importa lo alta y seca que sea la cima de la montaña, no importa lo recóndito y moderno del retiro, sudamos y lloramos básicamente agua de mar.

De importancia crucial para su traslado a tierra fue lo que los animales hicieron con el calcio. Este elemento constituye la materia prima de muchas estructuras biológicas magníficas, como el cráneo humano o los White Cliffs de Dover. La cantidad de calcio en solución en el citoplasma de una célula con núcleo debe mantenerse siempre alrededor de una parte por diez millones. Sin embargo, la cantidad de calcio en el agua de mar puede ser 10 000 veces o más superior a esta cantidad. El calcio tiende a penetrar en las células, obligándolas continuamente a liberarse de él. Como todas las células nucleadas actuales, las primeras células animales tuvieron que excretar calcio para mantenerse sanas. Actualmente, el carbonato de calcio lo fabrican unas células especializadas situadas en el interior de sacos membranosos. La substancia caliza es transportada al exterior de la célula en forma precristalina, a

través de unos canales (a lo largo de los cuales discurren los ubicuos microtúbulos).

El calcio tiene una parte destacada en el metabolismo de todas las células con núcleo. Juega un papel indispensable en el movimiento ameboide, en la secreción celular, en la formación de microtúbulos y en la adhesión celular. El calcio en disolución debe ser extraído continuamente de la solución que rodea a los microtúbulos para que éstos funcionen en la mitosis, en la sexualidad meiótica y en la actividad cerebral. Debido a que la parte química de los mensajes quimioeléctricos enviados por las células nerviosas del cerebro tiene mucho que ver con el calcio, las redes cerebrales de comunicación que conectan las neuronas dependen del calcio tanto como las comunicaciones telefónicas por cable del cobre del teléfono. Hace unos 620 millones de años ya se habían formado los primeros y diminutos cerebros animales.

Quizá más importante para aquellos primitivos animales era el uso del calcio en el trabajo muscular. Los músculos se contraen cuando el calcio disuelto y el ATP son liberados a su alrededor en cantidades adecuadas. El calcio debe mantenerse de manera escrupulosa en cantidades bastante inferiores a las del agua de mar; en caso contrario, la química entra en acción y se produce fosfato de calcio, que es eliminado de la disolución en forma sólida. (Esta es la razón por la que los atletas que sobrecargan sus músculos suelen desarrollar depósitos de calcio.) El tejido muscular y las proteínas del tipo de la actinomiosina que la forman suelen ser iguales en todos los animales. El origen de la actina es un misterio de la evolución. Se ha descrito una proteína parecida en *Thermoplasma,* un supuesto antepasado de nuestras células. De confirmarse, tendríamos un caso más de una invención que se originó en el microcosmos bacteriano.

Los animales acuáticos de cuerpo blando de la fauna de Ediacara nadaban sirviéndose de sus músculos. Para ello controlaban su metabolismo del calcio. Como la contracción muscular responde a la liberación de calcio, es muy probable que las criaturas marinas de principios del Cámbrico, incluso los primeros anélidos, tuvieran músculos que respondían al control

del calcio. Como las corazas y yelmos de griegos y romanos, algunos de aquellos animales primitivos debieron de secretar trozos y piezas de armaduras calcáreas y películas protectoras que no eran todavía esqueletos completos.

Es importante observar que algunas especies que en otros aspectos son muy próximas pueden diferenciarse por el hecho de que una puede producir calcificación y la otra no. Por ejemplo, la única diferencia entre dos especies muy relacionadas de algas rojas de la familia de las coralináceas es que una está recubierta de placas pétreas de carbonato cálcico mientras que la otra es completamente blanda. Stephen Weiner, del Instituto de Investigación Weizmann de Israel, cree que la especie calcificadora produce una substancia proteínica que tiene espacios regulares donde encajan los cristales de carbonato cálcico. La otra especie, en cambio, produce muy poca cantidad de proteína estructural o bien una forma alterada sin espacios adecuados. Por otra parte, como se dan algunos casos en que especies de organismos que se separaron hace millones de años pueden ambas producir carbonato en la actualidad, es probable que la capacidad de precipitación de compuestos de calcio de manera regular haya evolucionado con éxito muchas veces en especies muy diferentes y por motivos muy distintos.

Utilizado siempre por células nucleadas, el exceso de calcio tiene que ser excretado o amontonado de manera inofensiva fuera de la solución. Desde los tiempos del Cámbrico distintos organismos han venido acumulando sus reservas en forma de fosfato cálcico, que adopta formas tales como los dientes o los huesos, o en forma de carbonato cálcico, como en los caparazones calcáreos.

Los esqueletos no se formaron de la nada durante el Cámbrico: los músculos de la fauna de Ediacara precedieron a los esqueletos del Cámbrico. La necesidad de responder de manera continuada a los excedentes de la célula hizo que para algunos animales resultase fácil acumular sales de calcio en el interior o en el exterior de sus cuerpos en montones de desechos que acabaron convirtiéndose en esqueletos y cubiertas externas. De la misma manera que las termitas construyen sus nidos principalmente con excrementos de insectos y saliva, así

los esqueletos y dientes están hechos de compuestos químicos que en un principio tenían que ser excretados como productos de desecho.

La mayor parte de caparazones y cubiertas externas de animales se componen actualmente de carbonato cálcico. Los diminutos protistas del océano, como foraminíferos y cocolitoforinos, han expulsado tanto calcio al océano durante tan largos periodos de tiempo que produjeron la famosa pieza del patrimonio inglés que se conoce como los White Cliffs de Dover, un depósito en forma de torre de caliza y yeso. (Como el carbón o el petróleo, tales reservas de carbono orgánico no se desperdician, sino que se tienen almacenadas en la biosfera hasta que la vida descubre nuevos caminos para reciclarlas.)

Los nuevos órganos que sustituyeron los antiguos, que estaban siempre inmersos en agua, se vieron abocados al éxito. Las branquias, que tan bien captaban el oxígeno del agua, no tenían utilidad en el aire. Miles de años después se convirtieron en vestigios, como las hendiduras branquiales que parecen pequeñas cicatrices bajo las orejas de los fetos humanos. En algunos cordados, como anfibios, reptiles y mamíferos, se formaron los pulmones, capaces de proporcionar aire al sistema circulatorio. Un sistema análogo de canales aéreos llamados tráqueas se formaron en los artrópodos adaptados a la vida terrestre, como arañas e insectos.

Al enfrentarse con temibles peligros ambientales, los organismos se defienden de la necesidad de cambio radical incorporando lo nuevo en lo viejo ya conocido. El conjunto de huesos que se desarrolló en los peces nadadores sirvió posteriormente para sostener a los anfibios en tierra y para mantener a las aves de manera aerodinámica en el aire. Los residuos de calcio cerca de los músculos se convirtieron en material básico para la construcción. De los vertebrados primitivos evolucionaron los peces, seres con simetría bilateral que eran esencialmente unos artistas de la huida, además de velocistas, eludiendo vertiginosamente a sus depredadores y persiguiendo con rapidez a sus presas.

La competencia entre crueles depredadores, además de la desecación en aguas poco profundas, forzó a los animales primitivos a vivir en tierra. Pero los suelos abrasadores no eran la mejor alternativa a los mares conflictivos. La tierra era en algunos aspectos un paraíso terrenal, un santuario libre al principio de depredadores peligrosos. Pero también era un infierno, un medio ambiente donde había que enfrentarse a un sol abrasador, un viento cortante y a una capacidad de flotación disminuida. Las estructuras calcificadas, como la concha del caracol terrestre, empezaron como vertidos del exceso de calcio, pero acabaron siendo una combinación de estructuras de soporte, protección contra la luz solar y los depredadores y «acuarios» orgánicos que protegían al animal de los peligros de la desecación.

En todo lo que se ha escrito sobre la evolución y expansión hacia el medio terrestre de vegetales y animales, es fácil olvidarse del papel de los hongos. Los hongos representan una tercera vía de organización fundamental en la evolución de las células con núcleo. Se desarrollan a partir de esporas y forman unos finos tubos llamados hifas, los cuales están frecuentemente divididos por unos tabiques llamados septos. Parte de su organización alternativa incluye el hecho de que las células fúngicas pueden, cada una de ellas, contener muchos núcleos, y que el citoplasma puede fluir más o menos libremente de una célula a otra a través de los septos. A diferencia de los animales que poseen estómago, los hongos realizan la digestión en el exterior de sus cuerpos. Para crecer absorben los nutrientes en forma de compuestos químicos en vez de obtenerlos por fotosíntesis o ingestión de alimentos. Mohos, colmenillas, trufas, levaduras y setas son ejemplos corrientes de hongos. De las 100 000 especies que se calcula que existen, la mayoría son terrestres.

Aunque son considerados un reino aparte, los hongos están relacionados con los vegetales. Probablemente se originaron a partir de una línea de protistas parecidos a los hongos actuales que absorberían el alimento directamente a partir de algas, vegetales y animales vivos o muertos, y los hongos parecen haber evolucionado conjuntamente con los vegetales en su emigración hacia el medio terrestre. Se conocen fósiles de hongos, hallados sobre todo en fósiles de tejidos vegetales, de más de

300 millones de años de antigüedad. Asociados de manera simbiótica con las raíces de las plantas, los hongos transfieren fósforo y nitrógeno por todo el planeta. Sin los hongos, los vegetales morirían de inanición al carecer de estos nutrientes minerales. Por eso se ha sugerido que los bosques primitivos no habrían sido posibles sin ellos. Al tratarse de organismos con gran capacidad de adaptación, los hay que pueden crecer en medio ácido, mientras que otros pueden crecer en medios muy pobres en nitrógeno. Su pared celular quitinosa, dura y rígida, que resiste la sequía, hace de ellos un grupo idóneo para la vida en tierra.

Todos los hongos forman esporas. Cuando existe la amenaza de la desecación y no hay compañeros disponibles, se forman inmediatamente esporas asexuadas, sin tener que preocuparse por el sexo. Por otra parte, muchos hongos se complacen en extremo con la sexualidad meiótica. En algunos se pueden dar hasta 78 000 tipos distintos (o «sexos») para el apareamiento en una misma especie, como ocurre en *Schizophylum commune,* el hongo que crece a los lados de las carreteras.

Los hongos son un reino muy infravalorado, que antes se colocaba, con las bacterias y otras formas no animales, en el reino *Vegetales.* Pero organismos como las setas de sombrero y las levaduras presentan características tan peculiares que actualmente los biólogos coinciden en afirmar que merecen un rango taxonómico separado en el reino de los *Hongos.*

Los hongos, además, son un componente de la cultura humana. En el sur de Francia se entrenan cerdos para que localicen, por el olfato, las trufas, que, consideradas una delicia culinaria, están unidas de manera tan íntima a determinados árboles que nadie ha podido cultivarlas. Utilizamos la penicilina, una sustancia antibacteriana que se obtuvo por vez primera hace tiempo a partir de *Penicillium,* el moho que se forma en el pan y en la fruta. La penicilina actúa contra las bacterias impidiéndoles la formación de su pared celular. Por eso este hongo, salvándose a sí mismo, ha salvado también millones de vidas humanas.

Sin embargo, los hongos, como las bacterias, no son siempre beneficiosos. El cornezuelo puede infectar campos enteros de centeno causando el aborto espontáneo en el ganado que consume el cereal infectado y una enfermedad incurable llamada fuego de San Antonio. En la Edad Media, las personas que comían pan hecho con el cereal infectado se envenenaban. Además, el cornezuelo contiene ácido lisérgico, a partir del cual el químico suizo Albert Hofmann sintetizó por primera vez la dietilamida del ácido lisérgico, o LSD. Cuando experimentaba con ácido lisérgico, droga que se utilizaba en pequeña cantidad para inducir el parto y que detiene la expulsión de la placenta, además de prevenir la enfermedad coronaria, Hofmann descubrió el LSD, el alucinógeno más poderoso que se conoce, de manera accidental.

La tendencia de los hongos y las substancias relacionadas con ellos a interferir con procesos metabólicos muy dispares de animales y bacterias sugiere antiguos mecanismos evolutivos de defensa. Los cambios psicofarmacológicos inducidos por alucinógenos como los de las setas *Amanita* y *Psilocybes* representan modelos de supervivencia coevolutivos de animales que nos precedieron. Imaginemos la intensa presión de selección sobre los hambrientos mamíferos antepasados nuestros. Esa presión pudo originar pronto animales que podían procesar metabólicamente alimentos que antes eran tóxicos para ellos. Algunos de aquellos alimentos eran hongos y plantas o asociaciones de éstas de hongos y vegetales que abundaban mucho en el medio ambiente. Sobre plantas y hongos, a su vez, se ejercía una presión para desarrollar de nuevo alcaloides disuasores como el cornezuelo. Los animales que procesaban el alimento cargado con el alcaloide apenas sobrevivían a la experiencia metabólica. Los agentes que alteran la mente y el cuerpo pueden hacer pensar en algo así como una guerra metabólica: la coevolución imperfecta de las especies devoradoras y las que son devoradas.

Aunque todo esto es especulativo, queda claro que todas las especies que en algún momento han evolucionado lo han hecho al mismo tiempo que otras. Eso vale para el macrocosmos, naturalmente, tanto como para el microcosmos. A pesar de que el desarrollo de alcaloides por parte de plantas y hon-

gos para regular sus correspondientes índices de crecimiento o para disuadir a los depredadores animales puede ser contemplado como una escalada de armamento químico, es también un recuerdo de las simbiosis del macrocosmos. Los hongos son los principales causantes de enfermedades en los vegetales. Pero también son decisivos para su supervivencia. Las relaciones crueles entre depredador y presa a menudo pueden ser vistas como parte de simbiosis mayores en las cuales plagas asesinas pueden ayudar a las poblaciones afectadas impidiéndoles que su crecimiento desborde la disponibilidad de alimentos.

En realidad, no hay muchas novedades en nuestro moderno eón Fanerozoico (que empezó hace 570 millones de años). Exceptuando innovaciones esotéricas tales como el veneno de las serpientes, sustancias alucinógenas producidas por hongos y vegetales y la corteza cerebral, a finales del eón Proterozoico (que va desde 2500 hasta hace 580 millones de años) ya se había realizado la evolución de casi todas las principales técnicas de supervivencia que la vida utiliza en la actualidad. Bacterias verdes, vestigios de espiroquetas y mitocondrias hacía tiempo que habían aparecido en escena. En una Tierra en continuo cambio, mantenían los antiguos descubrimientos de la vida primitiva al evolucionar hacia formas nuevas que conservaban, sin embargo, capacidades tan exquisitas como la obtención de alimento a partir del Sol, la organización de la información genética y la combustión del peligroso oxígeno. Algunas de las recombinaciones microbianas eran animales que vivían en la orilla del mar, con capacidad para controlar su nivel de calcio. Pero las formas reales adoptadas por los animales son casi accesorias para los microorganismos. El punto realmente importante es que, al mantener su medio primordial en estructuras estables y resistentes al agua como los esqueletos externos, los microbios tenían la posibilidad de expandirse y así lo hicieron. Al hacerlo, dejaron restos animales que durante mucho tiempo fueron considerados como los fósiles de las primeras formas vivas de la Tierra. Ahora ya sabemos más al respecto.

La vida en la Tierra es una historia tan interesante que uno no puede permitirse el lujo de perderse el principio. Si ignorásemos el microcosmos al estudiar la historia de la naturaleza, sería como empezar el estudio de la civilización con la fundación de Los Angeles. Plantas, hongos y animales surgieron todos del microcosmos. Por debajo de nuestras diferencias superficiales todos somos comunidades andantes de bacterias. El mundo resplandece y es un paisaje puntillista hecho de diminutos seres vivos. Los bosques de gigantescas secoyas y las ballenas, los mosquitos y las setas son intrincadas redes simbióticas, manifestaciones modulares de la célula con núcleo. Estos organismos actuaron por poderes en nombre de los microorganismos para encontrar el camino hacia la sequedad del medio terrestre.

12
El hombre egocéntrico



El hombre es el egotista consumado. Antes de que Copérnico fundase la moderna astronomía, nuestros antepasados creían que su hogar, la Tierra, estaba en el centro del universo. A pesar de la demostración que hizo Darwin de que somos solamente una rama reciente de un árbol evolutivo, la mayoría de la gente aún cree que el ser humano es biológicamente superior a cualquier otro tipo de vida. Mark Twain en «La maldita raza humana», artículo que fue censurado en su época, lo expresaba así:

«A partir de entonces y durante casi otros treinta millones de años la preparación avanzó con energía. A partir del pterodáctilo se desarrolló el pájaro; a partir del pájaro el canguro y, del canguro, los otros marsupiales; de éstos, el mastodonte, el megaterio, el perezoso gigante, el alce irlandés y todos aquellos animales de los que se pueden obtener útiles e instructivos fósiles. Luego sobrevino la primera gran glaciación y todos retrocedieron ante ella y cruzaron el puente del estrecho de Bering y fueron rodando por Europa y asia hasta morir. Todos, excepto unos pocos, para continuar la preparación. Seis glaciaciones, con períodos de dos millones de años entre cada una de ellas, acosaron a aquellos pobres huérfanos por todos los rincones de la Tierra, con climas extremos, desde un calor tropical abrasador en los polos hasta heladas árticas en el

ecuador, que se iban alternando, sin saber nunca cómo sería el siguiente cambio climático. Y si en alguna ocasión se establecían en algún punto determinado, todo el continente se hundía debajo de ellos sin previo aviso y tenían que tratar el sitio a ocupar con los peces y revolverse hacia el lugar donde había estado el mar, y sin apenas un harapo seco con que cubrirse. Y cuando todo volvía a la normalidad, un volcán entraba en erupción y los expulsaba del lugar en que habían estado viviendo. Llevaron esta vida errante y molesta durante veinticinco millones de años, la mitad del tiempo en el mar y la otra mitad en tierra; y preguntándose siempre por qué, sin sospechar, naturalmente, que era una preparación para el hombre y que tenía que hacerse así o no habría ningún lugar adecuado y armonioso para él cuando llegase.

»Y por fin llegó el mono y era fácil ver que el hombre ya no estaba lejos. Y así era en verdad. El mono continuó desarrollándose durante casi cinco millones de años y luego se convirtió en hombre, bajo todos los aspectos.

»Y ésta es la historia. El hombre ha estado aquí desde hace 32 000 años. El que fueran necesarios cien millones de años para preparar el mundo para él demuestra que es para eso para lo que fue hecho. O así lo supongo yo; no sé. Si la Torre Eiffel representase la edad de la Tierra en la actualidad, la capa de pintura en el saliente del pináculo de la parte superior sería el período de tiempo transcurrido desde la aparición del hombre. Y nadie repararía, o así creo yo, en que la torre había sido construida para sostener aquella capa de pintura».[44]

A diferencia de lo que sugiere Twain de manera sarcástica, el *Homo sapiens* no representa el pináculo del progreso. Aquellos que hablan en nombre del interés especial de la humanidad no aciertan a ver lo interdependiente que es la vida en la Tierra. No se puede tener una visión equilibrada de la historia de la evolución si se la considera únicamente como una preparación para el ser humano. El ochenta por cien de la historia de la vida corresponde a los microorganismos. Nosotros somos recombinaciones de los procesos metabólicos de

las bacterias consumidoras de oxígeno y de otras formas que aparecieron durante la acumulación de oxígeno atmosférico hace unos 2000 millones de años. Vestigios de bacterias con un DNA que los especialistas en biología molecular han considerado como extremamente similar al de las bacterias de vida libre se dividen en forma de mitocondrias en el interior de las células con núcleo de la gente mientras se leen estas líneas.

Los seres humanos no son particularmente especiales, separados o únicos. Al extender al mundo de la biología la idea de Copérnico de que no ocupamos el centro del universo, hemos de dejar de considerarnos como la forma de vida más importante del planeta. Esto puede ser un duro golpe para nuestro ego colectivo, pero no somos los amos del universo posados sobre el último peldaño de una escala evolutiva. Nuestra sabiduría es una permutación de la sabiduría de la biosfera. Nosotros no inventamos la ingeniería genética; nos introducimos en los ciclos de la vida de las bacterias, que han estado comerciando con genes y copiándolos por su cuenta desde hace tiempo. Nosotros no «inventamos» la agricultura o el desplazarse montado a caballo; nos vimos implicados en los ciclos vitales de vegetales y animales cuyo número aumentó al aumentar el nuestro.

De igual manera, los tan cacareados logros de la tecnología, desde la escritura en el sudoeste de Asia hace más de 10 000 años hasta el moderno microchip, no son de *nuestra* propiedad. Surgieron de la biosfera —del medio ambiente interconectado de *todas* las formas de vida— y finalmente, aunque tuvieran que evolucionar de nuevo, no nos pertenecen a nosotros, sino a la biosfera misma. Según nuestra teoría de la naturaleza del intelecto, que tendría su origen en las espiroquetas, la alta tecnología no sería nuestra, sino de naturaleza planetaria. Hemos estado distanciándonos de las demás formas de vida, incubando formas de organización que acaban siendo mayores y más ricas que nosotros mismos. Hemos hecho bien al separarnos de otros organismos y explotarlos, pero no parece probable que una situación como esa pueda durar. La realidad y la recurrencia de la simbiosis en la evolución sugieren que nos hallamos aún en una etapa de invasión «parasitaria», y que hemos de moderarnos, compartir y reunirnos con otros seres si queremos conseguir una longevidad evolutiva.

La historia de la aparición de los seres humanos y de su rápida propagación por la superficie del planeta apenas es una historia de conquista. Como herederos ricos y mimados, hemos heredado directamente la riqueza genética de aquellos animales que sobrevivieron a las mayores extinciones que se han dado en la Tierra, incluyendo los famosos acontecimientos del Cretácico, hace 66 millones de años, que no sólo destruyeron los dinosaurios, sino también muchas familias de mamíferos y plancton marino; y las extinciones aún más devastadoras del Permotriásico, hace 245 millones de años, que eliminaron completamente el 52 por ciento de todas las familias de seres vivos que existían en la Tierra por aquel entonces (comparado con el 11 por ciento del Cretácico). Se han ofrecido distintas teorías para explicar aquellas extinciones. Una es la desmembración del continente Pangea (el único que existía hasta entonces en la Tierra) en otros dos continentes cuando se produjeron las extinciones del Permotriásico. Otra es el choque contra la Tierra de un enorme meteorito cuando se produjo la catástrofe del Cretácico.

Durante los últimos 500 millones de años se han dado cuatro extinciones en masa aún más devastadoras que la que acabó con los dinosaurios. Desde el punto de vista estadístico se dice que las extinciones en masa se han ido produciendo aproximadamente cada 26 millones de años. Esto ha sugerido a algunos científicos, especialmente al astrónomo Richard Muller, de la Universidad de California en Berkeley, la existencia de «Némesis», una hipotética estrella hermana del Sol. Se ha sugerido la posibilidad de que Némesis, de manera cíclica, haga salir de sus órbitas a cometas de la nube de Oort y los envíe girando vertiginosamente hacia el Sol, acabando algunos de ellos chocando contra la Tierra y destruyendo partes vulnerables de la biosfera. (La nube de Oort, a la que se dio este nombre en honor de Jan Oort, astrónomo holandés, es un cinturón de cometas y restos cósmicos que se encuentra más allá

de Plutón. Puede representar el material sobrante del origen del sistema solar.) Otros científicos han sugerido que las extinciones se deberían al movimiento vertical regular del sistema solar a través del plano galáctico de nuestra galaxia espiral. El sol necesita unos 250 millones de años para moverse en círculo por el centro de la Vía Láctea, pero en su recorrido se mueve arriba y abajo. Al atravesar regiones densas del espacio se produciría una descarga de cometas de la misma nebulosa Oort. Cualquiera que fuera la causa de aquellas devastaciones periódicas, los descendientes de los seres que sobrevivieron a ellas heredaron la Tierra. Como el ave Fénix resurgiendo de sus cenizas, el DNA se regeneró en formas nuevas más duraderas. Podemos seguir la pista de nuestra historia, pero debemos recordar que no es más necesaria o más noble que la de cualquier otra especie viviente actual.

Los primeros animales vertebrados, criaturas relativamente grandes con una espina dorsal de fosfato cálcico y una caja craneana que protegía un elaborado sistema nervioso, pueden haber evolucionado hace unos 510 millones de años a partir de la larva de aspecto de renacuajo de animales invertebrados. Basándose en la semejanza en el desarrollo fetal de muchos animales y en los fragmentos de huesos en el registro fósil de finales del Cámbrico, hay una teoría que indica que las crías precoces de algunos invertebrados alcanzaron la capacidad de reproducirse sin experimentar primero la metamorfosis hacia la forma adulta. Estos animales ancestrales llamados cordados empezaron con columna vertebral, pero sin huesos. Como las formas con caparazón del Cámbrico, los experimentos en la acumulación de calcio condujeron a formas divergentes, tales como los primeros peces, con armadura externa pero carentes de mandíbulas. Aquellos peces primitivos sin mandíbulas, la mayoría de ellos del tamaño de una regla, se alimentaban succionando agua y lo que se encontrara en ella.

La reducción periódica de la línea de costa debido a fuerzas geológicas dejó literalmente a muchos peces fuera del agua y jadeando en las costas tropicales. A medida que se secaban los charcos de la zona intermareal, los lagos y los estanques de agua dulce, casi todos los animales acuáticos primitivos mo-

Tabla 2 - CLASIFICACION TAXONOMICA HUMANA

Taxón	*Comentario sobre el taxón*	*Cuándo?**
Reino Animales	Desarrollo a partir de una blástula	750
Tipo Cordados	Tubo neural dorsal, médula espinal y cerebro, hendiduras branquiales	450
Clase Mamíferos	Pelo y glándulas mamarias derivadas de glándulas sudoríparas, amamantan a las crías	200
Orden Primates	Mamíferos anatómicamente no especializados, que incluyen monos y lemures	60
Familia Homínidos**	Hombres-mono y monos-hombre	4
Género *Homo*	Todas las especies extinguidas, excepto la nuestra; probablemente descendemos de *Homo erectus*	0,5
Especie *sapiens*	Artistas, poetas, recolectores de alimentos, grandes cazadores	0,001

* En millones de años, retrocediendo desde el presente.
** Estos son los monos parecidos al hombre que han existido durante unos quince millones de años. La mayoría de biólogos creen que algunos monos y los humanos somos tan semejantes que deberíamos estar incluidos en la misma familia: Póngidos/Homínidos.

rían. Una excepción fueron criaturas como los peces pulmonados actuales de Australia, Sudamérica y Africa. En la actualidad los peces pulmonados respiran tanto agua muy oxigenada como el mismo aire. Se cree que los pulmones se formaron por evolución de una bolsa flotante de gas llamada vejiga natatoria, formada por bolsas intestinales.* Utilizados actualmente por muchos peces modernos para ascender y descender en el agua, los divertículos intestinales modificados de algunos peces ancestrales les permitían utilizar oxígeno cuando se encallaban en el barro o en tierra seca. Cuando los lagos y ríos se secan de manera estacional en Australia y en Africa, se produce una substancia en el cerebro de los peces pulmonados que hace disminuir su actividad como si estuvieran en hibernación.

* Ahora se sabe que es al revés: la vejiga natatoria evolucionó a partir de sacos aéreos que funcionaban como pulmones primitivos. *(N. del E.)*

Mientras que otros peces mueren en los lechos fangosos de los ríos, los peces pulmonados del género *Dipnoi* sobreviven de manera rutinaria para vivir otra estación. Pero los dipnoos no tuvieron la menor importancia en la evolución de los vertebrados, ya que se encuentran confinados en ríos susceptibles de sequías en zonas aisladas del globo. No fueron antecedentes directos de los peces ancestrales que empezaron a avanzar con dificultad hacia tierra.

Otro linaje de peces (que también poseen pulmones, pero a los que no se llama pulmonados), los crosopterigios de aletas carnosas, se originó hace unos 400 millones de años, en el periodo Devónico. Probablemente dieron origen a los primeros anfibios. *Eusthenopteron* es un género fósil de este linaje. Con espinas como las de los peces y aletas rechonchas, *Eusthenopteron* estaba próximo a la principal línea de animales que se desplazaban arrastrándose a lo largo de la costa. Con mandíbulas (contribución exclusiva de los peces al fantástico desarrollo posterior de todos los vertebrados terrestres) y una cabeza parecida a la de las ranas, *Eusthenopteron* parece un cruce entre anfibios y peces.

Se han encontrado formas semejantes a *Eusthenopteron* en el registro fósil hasta los tiempos del Triásico. Todos los antepasados de los anfibios, reptiles, aves y mamíferos tenían pulmones, que equivalían a branquias modificadas que podían soportar la falta de agua durante cortos periodos de tiempo. Durante los cataclismos del Permotriásico, los estanques que contenían peces ya se habían secado en muchas ocasiones. Mientras que hay quien cree que los antepasados de ranas, salamandras y tritones ya habían alcanzado el medio terrestre, otros sugieren que las ranas y salamandras modernas son lo suficientemente diferentes de los primitivos anfibios como para que esto indique un origen distinto a partir de los peces, hace quizá unos 240 millones de años.

Los anfibios primitivos se expandieron desde finales del Devónico hasta finales del Triásico, hace de 345 a 195 millones de años, alcanzando su momento de apogeo hace 310 millones de años como señores de las turberas. *Ichthyostega,* recreado a partir de fósiles hallados en Groenlandia, fue uno de los primeros anfibios verdaderos. Con pies carnosos, cola vestigial con escamas como los peces y cabeza de anfibio, *Ichthyostega* presenta una estructura esquelética relacionada con la de los peces que respiran aire. A finales del Paleozoico (hace entre 400 y 425 millones de años), en bosques con turberas entre los licopodios y cicadáceas, los anfibios se diversificaron en numerosas especies exóticas, de las cuales quedan pocas que nos resulten familiares, aparte de las ranas.

En el Triásico, sin embargo, la evolución de los reptiles estaba en marcha. Hace 245 millones de años los reptiles ya habían desplazado a los anfibios en el medio terrestre y hace 195 millones de años ya lo habían hecho también en el agua. Los reptiles tenían mandíbulas poderosas, la piel resistente a la desecación y, lo que es más importante, un nuevo tipo de huevos. Encerraron y recubrieron con una cápsula el medio acuático de sus antepasados anfibios. En vez de abundantes huevos gelatinosos de pequeño tamaño, las hembras de los reptiles ponían menor cantidad de ellos, pero eran mayores y más duros. En el interior de estos huevos de mayor tamaño las formas reptilianas se desarrollaban hasta completar su preparación para afrontar la vida terrestre. Ese huevo amniota con su gran ración de yema preparaba a los reptiles para vivir en tierra. El huevo de los reptiles (y posteriormente el útero de los mamíferos) recreaba y encerraba en su interior el tiempo anterior de vida acuática. La dura cubierta exterior de los huevos de los reptiles retenía el agua permitiendo, sin embargo, el intercambio de aire. En la actualidad aún existen muchos tipos de lagartos, cuyo principal linaje evolucionó hace 240 millones de años. Entre ellos se encuentran los lagartos sin patas o serpientes, cuya principal familia apareció hace tan sólo 30 millones de años.

Los anfibios nunca se libraron completamente del agua. Incluso en la actualidad fecundan sus huevos y se desarrollan en forma de renacuajos en lagos, corrientes de agua y charcas. Como contraste, las primeras fases del desarrollo embrionario de los reptiles se desarrollan siempre en el medio acuático del interior de los huevos fecundados. Esta encapsulación fue una brillante innovación en la evolución, comparable a la de las

semillas de los helechos del Paleozoico. En los reptiles, las aletas de los peces ancestrales se modificaron. Hoy la anatomía comparada de las patas de los lagartos, las pezuñas de los caballos y las manos humanas muestra que tales extremidades son aletas modificadas que protegen una estructura ósea interna común a todos los seres provistos de cuatro extremidades y espina dorsal. Otro cambio muy importante que acompañó a la transición de vivir en un medio líquido a vivir en un medio gaseoso fue el desarrollo de la queratina. Esta proteína, característica de la piel de los reptiles y del cabello de los mamíferos, hizo posible que los reptiles resistieran la desecación al salir del cascarón. La queratina podría ser una de las pocas innovaciones metabólicas que no proceden directamente de las bacterias y de sus consorcios.

Los primeros reptiles derivados de los anfibios, los antracosaurios, tienen como prototipo a *Seymouria,* un género fósil a medio camino entre los anfibios y los reptiles. Recreado a partir de fósiles hallados en el oeste de Texas, *Seymouria* es un animal que podría ser un antepasado directo de los humanos.

A partir de dichos antracosaurios —los primeros vertebrados adaptados a la vida terrestre— se realizaron fantásticas diversificaciones evolutivas llamadas «radiaciones evolutivas». Los reptiles del Mesozoico (hace de 245 a 66 millones de años) se apartaban y ponían sus huevos por toda la tierra verde y pantanosa. Los antracosaurios que condujeron hacia los mamíferos habían aparecido ya en tiempos del Pérmico (hace de 290 a 245 millones de años). Los primeros reptiles mamiferoides, una incógnita evolutiva que no presentaba seguridad de éxito futuro, eran una forma de vida tan poco llamativa en su tiempo como puedan serlo los erizos en los tiempos actuales.

Hace unos 216 millones de años otra línea de reptiles dio origen a aquellos «lagartos terribles» que fueron los dinosaurios. Como los peces antes que ellos y las aves después, los dinosaurios tenían espina dorsal y ponían huevos; probablemente sus espermatozoides debían de tener la típica cola en forma de látigo con la estructura 9+2, así como células en forma de bastón, también con la estructura 9+2, en las capas

sensibles a la luz de la retina de sus ojos. Ellos también provenían del microcosmos. En algunas especies, las crestas onduladas de su dorso puede que actuaran como placas solares pasivas para regular la temperatura corporal. Algunas especies agitaban amplias áreas de su piel y volaban. Otras nadaban. Algunas hembras de dinosaurio incubaban sus huevos en el interior de sus cuerpos. A través de su cloaca, aquellas madres parían crías vivas. La parte de la anatomía de nuestro cerebro que aparece no sólo en los monos sino también en serpientes y cocodrilos —la médula oblonga o tronco cerebral— puede haber llegado hasta el presente formando parte de la enorme herencia que nos legaron los reptiles.

Unos 200 millones de años después de la radiación adaptativa del período Triásico, que estableció las principales especies de reptiles —plesiosaurios y pequeños dinosaurios corredores, además de las tortugas marinas, serpientes y lagartos, que nos resultan más familiares—, desaparecieron los dinosaurios. Su extinción en el Cretácico ha sido siempre causa de especulación. Algunos creen que eran animales demasiado grandes y estúpidos, bestias a las que había llegado su hora. Hay pruebas recientes de que esto no era así. La extinción súbita de los dinosaurios y de muchas otras formas de vida que ocurrió hace 66 millones de años tuvo un origen extraterrestre y la causó uno o más planetoides procedentes del espacio exterior.

El iridio, un elemento poco frecuente en la Tierra, se encuentra a menudo en los meteoritos. Abunda de manera anómala en los sedimentos de finales del período Cretácico, especialmente en los del límite entre el Cretácico y la era Terciaria, que marcan la desaparición de tantas especies. La presencia de una capa de iridio en las rocas de aquella época en todo el planeta ha sido interpretada por los científicos Luis y Walter Alvarez (padre e hijo, que trabajan conjuntamente) y por sus colegas en California como una prueba de que un meteorito gigante de unos diez kilómetros de anchura chocó con nuestro planeta. Sugieren que el polvo levantado por el meteorito causó un prolongado oscurecimiento del planeta. Al reflejar el polvo el calor y la luz hacia el espacio, la

Tierra se habría enfriado y la fotosíntesis habría disminuido drásticamente. Se acumularon los cadáveres de bacterias, protistas y plantas. Las bacterias no fotosintéticas, los protistas, los hongos y los animales pasaban hambre. La producción era muy baja. Las extinciones de seres vivos se iban sucediendo. Los enormes dinosaurios sucumbieron.

Este guión apocalíptico quizá sea demasiado melodramático. El especialista en paleobotánica Leo Hickey, director del Museo Peabody de la Universidad de Yale, destaca que muchas especies vegetales del límite Cretácico-Terciario parece que no se vieron afectadas. Si un gran número de árboles, arbustos y hierbas crecieron tranquilamente durante millones de años, dejando fósiles antes y después de aquel periodo de transición, ¿cómo es posible que se produjera una persistente tormenta de polvo por todo el planeta con el consiguiente oscurecimiento del mismo? Puede que cayeran sobre la Tierra cuerpos extraños causando bruscas alteraciones en los modelos climáticos. Aquellos impactos pudieron originar cambios súbitos en la temperatura, la intensidad de la luz, el nivel del mar, etcétera, con la consiguiente destrucción de muchas comunidades de organismos, pero no de todas. Si el meteorito o meteoritos hubieran sido lo suficientemente grandes, los elementos contenidos en ellos que fuesen tóxicos para algunas formas de vida podrían haber entrado directamente en la atmósfera. Los vegetales capaces de tolerar bruscos cambios estacionales podrían haber sobrevivido.

Unos 210 millones de años atrás, les llegó el turno a los mamíferos. Corriendo y rondando en busca de su presa a la luz de la Luna, los mamíferos verdaderos más antiguos debieron de ser criaturas de pequeño tamaño despiertas y activas durante la noche. El aire frío inhibe a los reptiles, que no tienen capacidad para regular su temperatura corporal. Los mamíferos, sin embargo, en vez de hacerse más lentos, se vuelven más activos en ambientes fríos. El movimiento muscular genera calor y los mamíferos lo controlan y utilizan. Desde sus comienzos, originándose por evolución de criaturas con aspecto de pez, como *Seymouria,* a través de mamíferos-reptiles como *Cynognathus,* con dientes como los perros, los mamíferos estaban más adaptados para luchar contra el frío que los reptiles de los cuales surgieron. Aunque seguramente hubo reptiles capaces de regular su temperatura, la actividad continuada en temperaturas frías ha sido siempre un rasgo característico de los mamíferos. Despiertos y alerta durante la noche con dilatados ojos de mirada aguda, los mamíferos se apartaron de la dependencia de la luz y del calor del día y se extendieron hacia el norte y hacia el sur. A medida que se alejaron del calor y de los reptiles de los trópicos, los mamíferos desarrollaron mejores métodos de aislamiento para mantener constante su temperatura interna. Quizás algunos se recubrieran de plumas; nuestros antepasados seguro que secretaban los filamentos proteínicos de células de la piel que llamamos cabellos (otro uso de la queratina, en este caso como medio de protección contra el aire frío). Esa dura proteína animal que se formó en los reptiles se sigue utilizando para la fabricación de herramientas y armas orgánicas, como las garras de las aves y los cuernos de los rinocerontes.

Cuando aparecieron los mamíferos por evolución de los reptiles, las hembras dejaron de poner sus huevos en agujeros en el suelo o al exterior, al aire libre. En vez de esto nutrían a sus crías en el interior de su cuerpo, en el calor del útero materno. Después del nacimiento, las crías hambrientas succionaban secreciones de glándulas sudoríparas del vientre de la madre. Aquellas glándulas sudoríparas eran las glándulas mamarias y el nutritivo sudor era la leche, ese líquido rico en calcio.

Desde su aparición, hace unos 200 millones de años, los mamíferos y las aves se distinguieron de sus antepasados reptiles por las atenciones y cuidados especiales que dedicaban a su prole. La mayoría de reptiles tienen muchas crías, a las que abandonan una vez han salido del caparazón. Pero las aves modernas (las especies surgidas en los últimos 133 millones de años) y los mamíferos alimentan y cuidan de un número menor de crías, que son más vulnerables. Una actividad sin precedentes y unas obligaciones paternas que distinguieron a aves y mamíferos desde el principio.

Los primates más antiguos de comienzos de nuestra era

Cenozoica (desde hace 66 millones de años) eran animales pequeños y astutos, rápidos para saltar y escapar de los depredadores. Algunos de estos mamíferos comedores de insectos incluso se agarraban a las ramas con las garras modificadas que en el ser humano iban a convertirse en uñas. El saltar de rama en rama en el bosque por la noche les hizo adquirir una gran agudeza visual. Aquellos antiguos primates eran muy parecidos a las zarigüeyas y lemures y se les ha llamado prosimios. Los prosimios eran por tanto primates que precedieron a los primeros monos. Actualmente se encuentran prácticamente restringidos a Madagascar y el sudeste asiático, en lugares donde no abundan los monos. Se conocen fósiles de prosimios en Asia y en Africa.

Todos los primates actuales, excepto nosotros, son vegetarianos o insectívoros. Comen frutos secos, bayas, fruta fresca, hierbas e insectos. Algunos siguen dietas muy especializadas, como los lemures. (Hay un grupo que comparte su nido con abejas y se alimenta de néctar; otro utiliza el segundo dedo de la extremidad anterior, que es largo y afilado, para hurgar en los troncos en busca de las termitas y hormigas de las que se alimenta.) Nosotros, los humanos, somos los únicos carnívoros de entre todos los primates. El hábito alimenticio de comer carne lo adquirimos bastante tarde en nuestro desarrollo evolutivo, a juzgar por los dientes fósiles.

Al refugiarse en los árboles, donde podían evitar ser advertidos por animales menos ágiles, los primates parecidos a las zarigüeyas, no muy distintos de los pequeños mamíferos placentarios de Madagascar, desarrollaron lo que se llama la convergencia orbital, el desplazamiento gradual de los ojos desde los lados hasta el centro de la parte anterior de la cabeza. Este centrado óptico fue decisivo para la visión tridimensional, que era indispensable, a su vez, para calcular las distancias en los árboles. Nuestra capacidad para calcular alturas, nuestra tendencia a construir y reparar, quizá incluso nuestra tendencia a vivir en bloques de apartamentos de muchos pisos, se deben a la convergencia orbital, al desplazamiento de los ojos desde los lados de la cabeza hacia la parte delantera a lo largo de muchas generaciones.

Otra marca de la vida arbórea o de la habilidad para moverse por los árboles de algunos miembros del orden de los Primates fue el desarrollo de manos y pies prensiles con uñas aplastadas y un dedo opuesto a los otros. La cola prensil, que se encuentra sólo en los monos del continente americano, es una posterior adaptación de los primates a la vida en los árboles.

Actualmente, en el desarrollo fetal humano se observa una cola rudimentaria inadecuada bajo cualquier aspecto para las necesidades humanas. Incluso de vez en cuando nace algún niño con una pequeña cola. Aunque el nacimiento de niños con cola era un hecho que se solía atribuir al demonio, hasta los bebés normales muestran rasgos que nos recuerdan nuestros comienzos en los árboles. Tales apéndices sin utilidad alguna fueron una de las cosas que llamaron la atención de Charles Darwin hacia el sinsentido de la naturaleza. Los órganos rudimentarios, como se les llama, son partes que no desempeñan actualmente función alguna para la supervivencia. No sirven para nada excepto para recordar un primer momento evolutivo en que sí eran necesarios para sobrevivir. (Incluso el sexo con dos progenitores, como hemos visto, no tiene más sentido que el de una extraña herencia de los ciclos vitales de nuestros antepasados protistas). Pero los rudimentos evolutivos no tienen por qué ser estructuras como el apéndice o la cola; también pueden ser *procesos*. Poco después del nacimiento todos los bebés aprietan sus diminutos puños alrededor del dedo que se les ofrece. Esta acción universal de agarrar fuertemente con la mano debió de evitar las caídas de los primates ancestrales al asirse a la piel de la madre o a las ramas cercanas. De manera semejante, la impresión de caerse que a veces sacude al durmiente despertándole súbitamente puede ser una respuesta psicológica arrastrada desde la época de vida en los árboles. Dormir en los árboles es peligroso. Tanto en las actividades instintivas de los niños como en las tendencias psicológicas de los adultos se encuentran vestigios y recuerdos de nuestros antepasados prosimios. No tiene nada de extraño que los niños se asusten de posibles monstruos cuando se les deja solos en la oscuridad, a pesar de la evidente seguridad de sus

habitaciones. Hubo un tiempo en que esas emociones profundas tenían un indudable valor de supervivencia: los niños desvalidos representaban una deliciosa presa para los depredadores del bosque.

Los primeros primates fueron en su mayoría unos tímidos trepadores de árboles. Corrían, se escondían y colgaban de las ramas en las noches estrelladas. Este correr y esconderse, colgarse de las ramas y llevar una activa vida nocturna se veía complementado con otro elemento de aquella timidez que fue, finalmente, de gran importancia para su evolución: la incipiente tendencia hacia un comportamiento de cooperación social. La emisión de ruidos fuertes y frecuentes es una manera de mantener a distancia a los enemigos que, como táctica de supervivencia, en los primates precedió a la verdadera comunicación oral. Actualmente, como perros salvajes, los charlatanes babuinos se agrupan para luchar contra los depredadores en la desnuda sabana africana. Como hicieran antes que ellos las células y los insectos sociales, nuestros antepasados se agruparon. Reunidos, se atrevían a hacer lo que ninguno haría de manera individual.

En varios momentos y lugares, cuando los frutos secos y la fruta fresca escaseó, nuestros antepasados descendieron al suelo. Mantenerse alerta entre la hierba alta requería la postura erguida y una mirada rápida en todas direcciones. Los babuinos hacen esto actualmente, volviendo luego a la posición agachada. Tal reconocimiento tuvo su recompensa: los animales que mantenían la cabeza en alto podían dedicar sus manos a excavar en busca de raíces, a tirar piedras y a empuñar bastones y armas; a construir y a explorar. Sus pies se aplanaron a medida que los dedos de las manos adquirían habilidad. Hoy en día muchos monos utilizan los dedos de sus manos para arrancar del suelo los brotes de hierba y comerse los tallos tiernos o para escarbar con palitos en busca de insectos. Se ha descrito el comportamiento de un orangután enjaulado en el zoo del Central Park, que tira excrementos a los espectadores que echan cacahuetes o palomitas de maíz fuera de su alcance. Aplaudimos o agitamos las manos como signo de admiración. Nunca se habría manifestado toda la potencialidad

de las manos si no se hubiesen liberado de la superflua tarea de la locomoción.

De la misma manera que la excesiva producción natural de calcio y los simbiontes de movimiento rápido proporcionaron a la selección natural la materia prima para moldear sus esqueletos y llevar a cabo la mitosis, así los primates se encontraron con unas extremidades prensoras superfluas. La disponibilidad de elementos reproducibles adicionales que quedan libres para cumplir nuevas funciones puede clasificarse entre las *innovaciones redundantes,* que se dan desde el nivel molecular hasta el social. Son innovaciones redundantes moleculares las que se dan en los vegetales cuando éstos segregan alcaloides que desempeñan papeles nuevos para disuadir a sus posibles consumidores, o el desarrollo, en los animales, de glándulas hormonales a partir de substancias químicas preexistentes utilizadas de manera fortuita en la comunicación intercelular por los sitemas genéticos de sus antepasados. Innovaciones redundantes de tipo social se dieron cuando las sociedades de termitas y abejas se dividieron en trabajadoras, soldados y reinas. La sociedad lleva a cabo una especialización como la de las células de los clones de los miembros que la componen; pero esta especialización, que tiene valor de supervivencia, podría no haber ocurrido de no haberse dado antes una superabundancia o redundancia de elementos reproductores. El uso de las manos para tareas distintas de la locomoción, cosa que al principio fue ocasional y no necesaria, se hizo absolutamente imprescindible cuando aparecieron los hombres-mono.

Una explicación ampliamente aceptada de la evolución de nuestra especie sugiere que el ser humano es un mono retrasado en su desarrollo físico. Conocido técnicamente como *neotenia,* a partir de las raíces etimológicas que significan «mantener lo nuevo», la conservación de caracteres infantiles en la edad adulta puede haber sido de esencial importancia en los orígenes de la humanidad. El periodo de tiempo que el ser humano necesita para pasar de la lactancia a la niñez y alcanzar la pubertad y la edad adulta es más largo que en cual-

quier especie de simio. El momento de la aparición de los primeros dientes en las mandíbulas y del cierre de las suturas óseas en el cráneo después del nacimiento —procesos de calcificación que tienen precursores en el Paleozoico, hace de 580 a 245 millones de años— se retrasa en la especie humana en comparación con los chimpancés, orangutanes o gorilas. El bebé humano es, por consiguiente, una especie de feto de mono extrauterino, mientras que los adultos humanos se parecen a monos que no hubieran alcanzado la edad adulta. Pero la humillación de ser monos retrasados tiene sus compensaciones. Es una especie de doble negación que acaba produciendo un efecto contrario. Ser estúpido en ser estúpido o lento en ser lento puede tener sus ventajas. El retraso en el desarrollo nos da tiempo para aprender a espabilarnos.

Desde el punto de vista de los monos, nosotros nacemos demasiado pronto, antes de que estemos preparados para ello. Después del nacimiento, el peso medio del cerebro humano casi se triplica en los dos primeros años de vida, pasando de 350 gramos a 1000 gramos. Mientras chimpancés y orangutanes retozan gozosos en el útero materno, los seres humanos pueden «ponerse en cabeza» en sentido literal. Estamos expuestos a las influencias del medio externo y estas influencias nos moldean, dándonos nuestro aspecto final, cuando aún somos maleables y vulnerables. A diferencia de los antílopes, que saben correr desde que nacen, o de las crías de las tortugas, que nunca conocen a sus padres, a diferencia de todos aquellos animales cuyas crías están ya formadas y preparadas para afrontar el mundo exterior, nuestros bebés están formados a medias y por tanto completamente indefensos. Dependen de los adultos para todo y necesitan un largo periodo de maduración junto a ellos. Esto representa un gran cambio en el proceso repetitivo de crecimiento protector en el seno materno. ¿Por qué se ha invertido el curso de la evolución en el caso del ser humano?

A partir del registro fósil sabemos que nuestra postura bípeda, nuestra manera de andar sobre las dos piernas, precedió al desarrollo de nuestra voluminosa cabeza. Pero los monos de cabeza pequeña y andar erguido aún no eran humanos. Algunos debieron de tener hijos prematuros. El parto en ese caso era más fácil, al ser de menor tamaño la cabeza del bebé. Las crías prematuras de mono pudieron quedar marcadas por las experiencias en su contacto con el duro mundo exterior a edades más tempranas, lo que les habría permitido tener más tiempo para aprender a modificar su comportamiento. Aquellas crías de mono con experiencia se supone que aprenderían mejor, y a edad más temprana, los trucos de los adultos para sobrevivir. Como el parto prematuro depende en parte de la predisposición genética, es lógico suponer que las parejas de monos que conservaban rasgos juveniles en la edad adulta tendrían más hijos prematuros y con más rasgos neoténicos que sus compañeros.

De este cambio genético en la distribución del tiempo de desarrollo surgió una presión de selección esencial para que hubiera más nacimientos prematuros, más líneas mutantes de bebés prematuros. A las crías de mono nacidas relativamente desprovistas de pelo y sin desarrollar, o se las educaba y protegía del mundo exterior o morían. Algunos de aquellos monos llegaron a la adolescencia aún con poco pelo y conservaron sus rasgos infantiles una vez alcanzada la edad adulta. Tuvieron hijos con un cerebro de mayor tamaño; monos retardados más inteligentes que ningún otro mono. Este mismo guión se refuerza posteriormente al añadirle el elemento de la selección sexual cuando los machos elegían esposas con reminiscencias de las figuras representativas de las diosas de la fertilidad halladas en distintos puntos de Europa —mujeres de caderas anchas y grandes nalgas, lo que suponía un canal más ancho para el parto—, que en teoría podían engendrar individuos con el cerebro aún mayor.

La ventaja que representa el nacimiento de crías muy sensibles tiene también inconvenientes. Aquellas mentes habitaban diminutos cuerpos patéticamente indefensos. Y de esta indefensión de la cría —y esto es extraño— surgió la familia, surgió la civilización. Las hembras se vieron forzadas a alterar su estrategia de selección sexual. Desearon un nuevo tipo de hombre-mono. Las jóvenes madres buscaron el apoyo de machos que cuidasen de ellas mientras ellas cuidaban de las frágiles

crías aún no formadas del todo. Las mujeres escogían hombres de cerebro grande y los hombres de cerebro grande escogían mujeres de anchas caderas, iniciándose así un sistema de autorrefuerzo. La inteligencia empezó a engendrar inteligencia. De manera más específica, se cree que al lanzar piedras que aturdían o mataban a las presas de pequeño tamaño, los primitivos humanos fueron catapultados hacia un nuevo nicho evolutivo. Las aptitudes psicomotrices necesarias para trazar la trayectoria de los proyectiles y matar a una cierta distancia dependían del aumento del tamaño del hemisferio izquierdo del cerebro. En realidad, William H. Calvin, neurobiólogo de la Universidad de Washington, en Seattle, sugiere incluso que el predominio del uso de la mano derecha viene de un tiempo en que las madres iban solas de caza y al llevar a sus retoños agarrados al pecho izquierdo para tranquilizarlos con el reconfortante sonido del corazón (que tanto encontraban a faltar debido a su temprana expulsión del útero), no podían utilizar más que su mano derecha para arrojar piedras a los animales pequeños. Por consiguiente, de igual manera que los ordenadores se desarrollaron al principio para calcular las trayectorias de los aviones enemigos, la tendencia del ser humano al uso predominante de la mano derecha y la capacidad de hablar y de escribir puede que se deban al aumento de zonas de nuestro cerebro utilizadas para secuenciar funciones reforzadas en principio por el éxito de las madres de nuestros antepasados al lanzar piedras a presas de pequeño tamaño.

Finalmente, en el mundo de desarrollo retardado que siguió al mundo de los monos, las hembras perdieron el estro; dejaron de estar en celo en determinados momentos del año. Se consideraba más atractivas a las mujeres. Actualmente todas las hembras de los diferentes grupos de simios entran en estro. Los genitales de algunos primates adoptan coloraciones características como respuesta a cambios hormonales cuya finalidad es atraer a la pareja. Pero las hembras humanas son diferentes; pueden sentirse sexualmente excitadas en cualquier momento y no tienen un periodo de celo determinado. Los machos que dedicaron su tiempo a la familia puede que renunciasen al sexo al azar durante uno de los cambios de la organización

social. Al ser las hembras cada vez más receptivas sexualmente durante todo el año, los machos ya no tuvieron necesidad de rondar en busca de pareja. A un hombre-mono ocupado en procurar sustento a una mujer-mona y a sus necesitados pequeños, le bastaba con una o dos hembras a las cuales poder solicitar receptividad sexual prácticamente en todo momento. La familia que yacía unida permanecía unida.

Los grupos nómadas y los pueblos debieron de surgir cuando los machos, las hembras y los hijos se reunían en comunidades que podían servir de refugio protector de la nueva unidad familiar. Quizá la idea de «Madre Tierra» de las culturas primitivas (y también de las modernas) provenga de la exposición de los pequeños al mundo exterior en un momento en que están más preparados para permanecer en el útero materno. Psicológicamente, la tierra reemplaza a la madre y el mundo se vuelve una especie de segundo útero.

Otro ejemplo de la importancia de la neotenia en los orígenes del ser humano está relacionado con el hecho de que casi todos los mamíferos después de la lactancia pierden la capacidad para digerir la lactosa, la cual resulta perjudicial para la mayoría de adultos humanos. Pero se dan grandes grupos de humanos adultos bebedores de leche, entre los que se incluyen los semíticos, urálicos e indoeuropeos. Y esto es posible gracias a una mutación que se propagó a las poblaciones situadas al norte de Mesopotamia hace unos 8000 años. El aumento de adultos mutantes que toleraban la leche preparó el camino para una revolución en la ganadería, más profunda que el derrocamiento de un dictador: el ordeño de vacas, cabras y ovejas; el uso de arados y bueyes en agricultura y, posteriormente, la domesticación del caballo. La tolerancia a la leche proporcionó a los adultos una fuente de proteína animal que no requería matar ninguna presa y llevó a la obtención de nutritivos derivados lácteos, como el queso, el yogurt, el requesón y la mantequilla. Otra ventaja fue que, al contener vitamina D, que transporta calcio, la leche corregía la deficiencia en aquella vitamina, evitando así el raquitismo, una enfermedad ósea. La melanina, pigmento oscurecedor de la piel, también es útil en la prevención del raquitismo. En realidad, los

adultos bebedores de leche tenían la piel mucho más clara. Como escribe Nigel Calder: «Con la revolución de la vaca y el arado llegaron las divisiones sociales que caracterizan las culturas euroasiáticas, estableciendo diferencias entre pobres y ricos, entre señores y siervos, entre hombres y mujeres. La guerra se convirtió en algo cotidiano y los guerreros se establecían como reyes».[45] Aunque el ser humano ya había evolucionado unos cuatro millones de años antes de la expansión de aquellos primeros ganaderos, lo mencionamos porque la mutación que permitió a algunas personas digerir la lactosa después de la lactancia también fue una forma de neotenia. Retrasos en la sincronización genética, que hicieron más lentos algunos aspectos de los procesos de desarrollo de los primates, pueden haber llevado al ser humano al mismo despuntar de la historia tradicional. Hace unos 5500 años, elaboradas tablas de arcilla, adornadas con muchos dibujos simbólicos y signos, aparecieron en algunas ciudades de Mesopotamia.

Debemos ir con mucho cuidado cuando examinamos nuestra propia historia a partir del mundo microbiano. Cualquier exposición sumaria que se haga será una generalización y las generalizaciones de generalizaciones normalmente tienden a convertirse en relatos mejores a costa de convertirse en historias peores. Al poner el énfasis en el «mono retardado» o en la idea neoténica del desarrollo humano, hemos presentado una imagen simplificada en extremo, que debe tomarse como un aspecto de una historia multidimensional. Es bastante frecuente representar la evolución de la humanidad como si se tratara de la transformación épica de un héroe evolutivo individual: un pez pulmonado revolcándose en el agua, desarrollando extremidades de anfibio para llegar arrastrándose hasta tierra, donde finalmente, adoptará la postura bípeda en triunfante humanidad. Es una imagen sospechosamente mucho más cercana a la experiencia de la vida real de un ser humano individual que no de poblaciones en evolución. Somos *nosotros*, que emergemos del canal del parto tosiendo por falta de aire y que más tarde aprendemos a arrastrarnos y a caminar. De

igual manera, el hombre primitivo, representado en forma de nuestro adorado héroe de la evolución, es una criatura que tropieza al salir de su cueva con la porra en la mano. Se mantiene erguido y se estira antes de alcanzar la luz de la modernidad. Pero el peludo hombre de las cavernas saliendo de la enorme y oscura cueva de la Prehistoria es asombrosamente simplista. Un mito cultural reforzado por las películas de dibujos animados y las historietas, es más una extraña amalgama de oscuros recuerdos de infancia y narraciones arqueológicas que un verdadero relato de las variadas y diversas apariciones y extinciones reales de monos ancestrales a lo largo del tiempo.

Resulta imposible imaginar la verdadera complejidad de nuestros antepasados. Naturalmente, la mayoría no fueron sólo pre-monos, sino microbios. Pero no se puede hacer abstracción de treinta millones de generaciones de poblaciones de mamíferos de alta variabilidad para dar de ellos una concisa imagen visual o literaria sin una distorsión importante. Se tiende incluso a conectar los detalles, a construir imágenes individuales de tipo antropomórfico, quizá por sernos más familiares. Héroes evolutivos de ficción nos alivian del esfuerzo de visualizar la verdadera multiplicidad de las poblaciones, de seres no humanos y extraños.

Nosotros somos primates, y los primates somos animales de los trópicos: detestamos el frío y lo tememos. Al ser los primates muy abundantes y variados en los trópicos del Viejo Mundo y al haberse hallado fósiles de hombre-mono en Africa, Europa y Asia, todo el mundo está de acuerdo en opinar que el Viejo Mundo debió de ser la cuna de nuestros antepasados. Los únicos antropoides de la Antártida, Australia y del continente americano son los humanos o los que hay en los zoos.

Si los estudiosos objetivos de la evolución fueran ballenas o delfines, situarían a los humanos, chimpancés y orangutanes en el mismo grupo taxonómico. No existe base fisiológica alguna para clasificar al ser humano en una familia exclusiva de su grupo (Homínidos, que comprende a los monos-hombres y a los hombres-mono) separado de los grandes monos (los pón-

gidos: gibones, siamangs, gorilas, chimpancés y orangutanes). Lo cierto es que un anatomista extraterrestre no habría dudado en colocarnos junto a los monos, en la misma subfamilia o incluso en el mismo género. Los seres humanos y los chimpancés son más parecidos entre ellos que dos géneros cualesquiera de coleópteros escogidos arbitrariamente. No obstante, los animales que andan erguidos, con los brazos colgando libremente, son definidos con toda pompa como homínidos y no como póngidos. El único homínido existente en la actualidad es el ser humano.

Sin embargo, en el registro fósil se han encontrado muchos fragmentos de homínidos muy distintos. Se han identificado dos clases diferentes que avivan la imaginación del antropólogo. Las dos clases de animal que se encuentran en la línea divisoria entre el hombre y el mono son los australopitecinos (*hombres*-mono) y los *Homo* (*monos*-hombre). Algunas especies del género *Australopithecus* se mantuvieron hasta hace unos 500 000 años. Algunos australopitecinos podrían haber sido antepasados nuestros; otros, probablemente no.

A falta de cualquier prueba que explique la extinción de los autralopitecinos, algunos antropólogos han barajado la hipótesis de que *Homo* podría haber hecho de sus primos menos inteligentes los primeros miembros de una original lista no escrita de especies en peligro. El fin de los homínidos vegetarianos de mayor tamaño podría haberse visto acelerado por masacres o, en el caso de *Australopithecus robustus,* por una sobredependencia insidiosa de los primeros humanos verdaderos. Miembros de esta especie podrían haber sido incluso sometidos a esclavitud por miembros de nuestro propio género. El pesado *Australopithecus robustus* quizá seguía a nuestros antepasados y se alimentaba de sus despojos. Hasta podría ser, según la teoría desarrollada por Benjamin Blumenburg, del Leslie College, y Neil Todd, de la Universidad de Boston, que los enormes vegetarianos de inteligencia limitada se hubieran extinguido cuando nuestros antepasados los reemplazaron por perros primitivos. Originados por evolución de los zorros, los perros debían de ser mejores cazadores y guardianes, con un olfato mucho más desarrollado. Y al ser de menor tamaño, su

manutención resultaba más fácil y más barata que la de cualquier *A. robustus* seguidor de campamentos.

Se han identificado tres especies prehistóricas como miembros de nuestro género: *Homo erectus, H. habilis* y la subespecie más antigua de *Homo sapiens. Homo habilis* («hombre mañoso») fue un antepasado de la especie humana que, según parece, empezó a utilizar herramientas de piedra afiladas con gran destreza. *Homo erectus* («hombre erguido») puede haber sido el primero en usar el fuego. *Homo sapiens* («hombre sabio») es nuestra especie y se divide, como mínimo, en dos subespecies *Homo sapiens neanderthalensis* (el hombre de Neanderthal) y *Homo sapiens sapiens* (nosotros). La mayoría de antropólogos está de acuerdo en que todas las especies, excepto *Homo sapiens sapiens,* están extinguidas.

Los homínidos debieron de aparecer en escena hace unos dos millones de años. Estos homínidos extintos, que han sido reconstruidos a partir de menos de doscientos restos fósiles, constituyeron la línea de los primates que llevó hasta nuestra especie pero no hacia los gibones, gorilas, chimpancés y orangutanes. Los homínidos, tanto los *Homo* que llevaron hasta nuestra especie como los australopitecinos que evolucionaron hacia *Homo* o se extinguieron, tenían dos características fundamentales: eran tropicales y africanos. Tanto los primates como los hombres-mono fósiles y sus herramientas se han encontrado en excavaciones hechas casi exclusivamente en regiones tropicales y semitropicales del antiguo continente. En Africa se han encontrado las primeras piedras trabajadas por manos humanas o semihumanas. Los humanos son más parecidos en su estructura, composición química de sus proteínas, expresión facial y comportamiento social a los monos tropicales de Africa que a ninguna otra especie viviente animal. Además, conservamos adaptaciones para vivir en climas cálidos. Podemos disipar gran cantidad de calor, principalmente por evaporación de sudor.

A diferencia de los monos africanos, sin embargo, transpiramos por toda la superficie del cuerpo (entre uno y dos litros por hora de sudor se pueden evaporar a través de unos dos millones de glándulas sudoríparas). Nuestra sangre también

funciona como un refrigerante. Gran parte de ella viaja superficialmente bajo la piel. Cuando trabajamos en climas cálidos el volumen de sangre aumenta por retención de agua y sales. Vasos sanguíneos muy finos transportan la sangre hasta debajo de la piel, actuando de conductos de calor para la refrigeración. Como la adaptación al trabajo en condiciones de calor la compartimos todos los humanos, es lógico pensar que debía de ser compartida por nuestros antepasados inmediatos después de que se separaran del tronco común que originó nuestra especie y otros grandes monos actuales.

Mientras que el cazador-recolector con tradiciones orales apareció en el teatro evolutivo en tiempos relativamente recientes (hace menos de 100 000 años), nuestra especie en transición muestra continuidad con los australopitecinos africanos. Probablemente descendemos de madres como *Lucy*, una mujer-mono del norte de Africa cuyos restos fósiles se remontan a hace más de tres millones de años y a la cual sus descubridores bautizaron con ese nombre inspirándose en la canción de los Beatles *Lucy in the Sky with Diamonds*, que sonaba en las inmediaciones de las excavaciones cuando fue descubierta. Su extraordinariamente completo esqueleto fósil se encontró en el triángulo de Afar, cerca de Hadar, en Etiopía. Correspondía a la hembra de un animal erguido, marchador y corredor, de poco más de un metro de altura. Aunque Lucy tenía la pelvis de una mujer pequeña y delicada, su cara era la de un chimpancé.

Se han encontrado esqueletos parciales y dientes pertenecientes a varias docenas de individuos en la misma zona. *Lucy*, según Donald Johanson, uno de sus descubridores, es el prototipo del homínido ancestral *Australopithecus afarensis*. En realidad, homínidos como *Lucy* y sus parientes (entre los cuales nos contamos), pueden haber tenido antepasados comunes con aspecto de chimpancé hace sólo unos cuatro millones de años.

La nueva ciencia de la evolución molecular nos ayuda a calcular el tiempo de evolución. Los datos que se obtienen de moléculas de gran tamaño nos permiten dar cuenta de los cambios que se han dado en la divergencia de dos líneas que

parten de un tronco común. Por ejemplo, el análisis de los aminoácidos de proteínas comunes tales como la hemoglobina del chimpancé y la hemoglobina humana muestra pocos cambios moleculares. Se puede calcular el tiempo de divergencia desde un antepasado común a partir del número de diferencias encontradas. La hemoglobina humana y la de los antropoides son notablemente semejantes entre sí. Utilizando la escala macromolecular desarrollada para otros animales, algunos biólogos, como Alan Wilson, de la Universidad de California en Berkeley, llegaron a la conclusión de que el linaje del chimpancé africano se separó del nuestro hace solamente unos cuatro millones de años y no los 15 o 20 millones que antes se creía.

Los primeros seres humanos, cuyos antepasados vivieron en el Plioceno desde hace entre 7 y 2 millones de años, obtuvieron un gran éxito como especie durante aquel periodo, cuando se produjeron las glaciaciones. En la época de su mayor expansión, Europa central, Asia y Siberia quedaron cubiertas por una capa de hielo. En Inglaterra los bloques de hielo flotaban por el Támesis, congelándose el agua desde el océano. En Norteamérica los glaciares cubrían Nueva Inglaterra y alcanzaban lo que en la actualidad es el centro de Indiana, Illinois y el sur de Ohio. El hombre primitivo se había propagado como una plaga desde su cuna tropical en tiempos relativamente cálidos. Pero, lejos del hogar, el frío y la nieve a los que no estaba originariamente acostumbrado le pillaron de improviso y aquello fue una prueba para él. En los periodos interglaciares el calor le visitó de nuevo; pero el agua procedente de los témpanos de hielo que se fundían hizo subir el nivel del mar y le privó de las tierras costeras. Hubo animales gigantes del Pleistoceno, como hipopótamos, mastodontes, rinocerontes y tigres de dientes como sables, amantes todos de climas cálidos, que no superaron la prueba de la nieve y heladas de finales de aquel periodo. Una nueva fauna substituyó a aquellos animales, que fueron presa de hambrientos pueblos en retirada. Bueyes almizclados, mamuts y rinocerontes de cuerpo lanudo, lemmings, bisontes, uros, caribús (renos) y otros animales resistentes al frío surgieron al persistir los

hielos. Nuestra herencia es tropical, pero somos hijos de las glaciaciones.

No se está completamente de acuerdo en cuanto a las fechas de las glaciaciones. Desde las más antiguas hasta las más recientes, las glaciaciones reciben el nombre de Gunz (que empezó hace unos 700 000 años, Mindel, Riss y Wurm. Aquellos periodos de máxima extensión del hielo en Europa apenas se corresponden con las glaciaciones de Nebraska, Illinois, Kansas y Wisconsin, en Norteamérica. Los periodos cálidos interglaciares se conocen como Gunz/Mindel, Mindel/Riss y Riss/Wurm. La última glaciación debió de alcanzar su punto álgido hace tan sólo unos 18 000 años. Estamos aún recuperándonos de aquel invierno planetario.

El más impresionante registro de asentamiento humano continuado se encuentra actualmente en la garganta de Olduvai, una zona extremadamente seca y expuesta al sol al este de Africa. Hace unos dos millones de años (al principio del Pleistoceno y hasta antes de las más recientes glaciaciones), esa región ecuatorial fue elegida como zona residencial.

En lo que es actualmente Tanzania, el gran cañón de Olduvai nos ha ido proporcionando restos fósiles continuamente. Podemos imaginarnos el sistema de la venerable escuela de Olduvai con sus cursos (elemental, intermedio y avanzado) de construcción de herramientas, que es la industria humana más antigua y de la cual nació la tecnología. En las excavaciones se han encontrado piedras en forma de martillo (azuelas que debieron de utilizarse en la fabricación de otras herramientas) y yunques (rocas usadas para sostener otras piedras que se trabajaban dándoles distintas formas). También se han encontrado lascas y otros fragmentos de roca sin modificar. Se les conoce con el término francés «debitage» y debían de utilizarse para cortar carne o madera. Los «manuports», rocas volcánicas transportadas manualmente, aunque no han sido modificadas, se consideran también artefactos porque han sido trasladados, a veces a grandes distancias, desde su lugar de origen.

En algunos puntos del cañón se ha tenido la suerte de poder reconstruir escenas completas. En la parte inferior del «yacimiento II» se descubrió un esqueleto de *Deinotherium,* un elefante extinguido que debió de quedar atrapado en una ciénaga. Existen pruebas de que al mamut se le quedó trabada una de sus enormes patas; los homínidos separaron la cabeza del animal, trituraron su cráneo y dejaron una de las cuchillas incrustada en los huesos de la pelvis. Sin duda, debieron de hacer un banquete con los restos de la pobre bestia atrapada. De todos modos, no se han encontrado restos de esqueletos humanos; parece ser que los cazadores supieron evitar el hundirse a su vez en el barro.

No se sabe si aquellos homínidos pertenecían al género *Australopithecus* o más bien al género *Homo.* Pero debieron de ser animales sociales. Y seguro que eran valientes, fuertes y mucho más polifacéticos que un burócrata o un fontanero de hoy en día. Pero, aunque menos especializados que los trabajadores actuales, aquellos cazadores del «yacimiento II» tenían algo en común con ellos: su dependencia de otros individuos para la alimentación. No celebraban sus banquetes en solitario. Ningún hombre, por más héroe que fuera, se atrevía él solo con el mamut. Como cazaban juntos, debieron de compartir, de manera habitual, su alimento. El hecho de compartir el alimento se cree que ha catalizado el desarrollo de la cultura humana y la civilización. En la descripción antropológica se ha comparado el compartir el alimento con el desarrollo de las hachas y puntas de lanza de pedernal. William Irwin Thompson, crítico cultural e historiador, ha resumido así las diferencias entre esas dos perspectivas:

«Un grupo de antropólogos dice que fueron las armas lo que nos hizo humanos. Al empuñar las herramientas de piedra nos desprendimos de la inocencia animal y empezamos a enfrentarnos a la naturaleza armados con ayuda de la primera tecnología. Entramos con fuerza en un nivel tecnológico nuevo y todo lo que íbamos dejando atrás era lo primitivo. De esta manera la tecnología creó y determinó la cultura humana. Y la tecnología más básica de todas es el arma... Afortunadamente hay otra visión científica de los orígenes de la humanidad, la que se asocia al trabajo del antropólogo Glyn Isaacs, que considera que los protohomínidos llevaban su comida

hasta un refugio más seguro y allí, en un acto de definición de la comunidad, compartían el alimento. Desde esta perspectiva, el acto primario de la cultura humana es el compartir la comida y podemos darnos cuenta de que cuando compartimos el alimento estamos llevando a cabo un acto de humanidad básica».[46]

Los homínidos de Olduvai comían bien y por la noche se revolcaban con sus mujeres, las cuales daban a luz, con toda seguridad, niños sanos. Como mínimo, alguno de aquellos niños aprendió de sus padres a construir y utilizar herramientas. Y aquellos homínidos debieron de compartir no sólo su alimento, sino también sus planes de caza. Aquellos que recordaban los planes y realizaban su misión tal como había sido planeada probablemente continuaron comiendo bien. Los que realizaban planes y compartían el alimento tenían hijos que comían bien. Los de Olduvai probablemente aprobaron sus exámenes evolutivos y dejaron más descendencia que otras bandas de monos-hombre menos coordinadas desde el punto de vista social.

La civilización moderna es una extensión de la destreza e inteligencia animal que se desarrollaron en los monos antepasados nuestros. La socialización de los pueblos primitivos impuesta por las glaciaciones fue un proceso violento e imparable. Con la manufactura de objetos naturales para cazar y al vestirse con las pieles de los osos de las cavernas y de los gatos monteses, el ser humano aprendió a ser más espabilado que los amenazadores mamíferos de mayor tamaño. Gran parte de la cohesión del clan, así como las persecuciones a las bestias de gran tamaño por las llanuras primitivas, se han mantenido en las culturas modernas. Con otro aspecto exterior, aquellas estrategias de supervivencia que tanto éxito alcanzaron tienen su versión moderna en los deportes de equipo y en las guerras. En el fútbol, la caza parece reducida al acto simbólico de grupos de hombres persiguiendo un objeto hecho de piel de animal. El balón es lanzado por los aires: una lanza simbólica que deja su marca. De igual manera, la actividad tribal de la guerra no ha disminuido, sino que se ha extendido. Aquellos antepasados nuestros que se comunicaban por medio de gestos y gritos ininteligibles cazaron las especies más importantes de grandes mamíferos hasta causar su extinción. En la actualidad, el ímpetu de la caza mayor ha llevado a nuestra propia especie al borde de la autoextinción. Como escribe Thompson: «El tecnócrata puede dirigirse a la humanidad tradicional para decir: "Somos los superiores, los más avanzados; vosotros sois simplemente la escoria de una vieja naturaleza animal". Para ellos la carrera de armamentos no es un mal necesario ni una patología característica; representa el motor de la misma evolución humana».[47] Realmente, la evolución humana, como todo tipo de evolución, tiene los dos aspectos, participación y combate, competición y cooperación.

El lenguaje es un utensilio tan temible como la punta más afilada de obsidiana. Podemos imaginar el desarrollo accidental del lenguaje, que se fue reforzando poco a poco, entre los pueblos primitivos. Los participantes en la cacería debían de emitir sonidos de placer al reunirse cautelosamente por la noche para comer alrededor del fuego. Aquellos sonidos, al repetirse, se volvieron nombres representativos de cosas. Por ejemplo, la palabra «mamut» pudo surgir cuando uno de los que habían dado muerte a aquella bestia se relamía y daba gruñidos de aprobación. Los que participaban en el festín y el cazador recordarían aquella palabra y la asociarían a determinadas imágenes, sonidos y olores.

De ahí se desarrollaría un vocabulario básico. Un vocabulario de cualquier tipo es mejor que nada y tiene un valor de supervivencia. Los que tenían más palabras en común podían comunicarse y organizar mejor las cacerías (no sólo de animales cuadrúpedos de cuerpo cubierto de pelo largo, sino entre ellos mismos). Se desconoce por qué desarrollaron nuestros antepasados una protolaringe, que posteriormente sería el instrumento del habla. Pero esto formaba parte del bagaje físico de los homínidos que tuvieron éxito; era un requisito previo al instrumento fatal de la comunicación verbal.

Se hicieron garabatos en las paredes con sangre de ani-

males. Estas pinturas primitivas al principio iban asociadas a la caza y eran una celebración natural de la misma. Pero aquella pintura hecha con los dedos evolucionó y acabó siendo figurativa. La magia simpática se volvió simbolismo. El zumo de bayas rojas exprimidas significaba sangre y otras configuraciones de pigmentos se convertían en los animales de las cacerías. Con la manipulación de los símbolos en varias secuencias los seres humanos empezaron a explorar las posibilidades de las realidades potenciales.

A lo largo de los siglos las toscas representaciones se hicieron más claras y se perfeccionaron. Algunas marcas rituales originaron los jeroglíficos (símbolos representados por imágenes) y los ideogramas (símbolos representados por imágenes a los que corresponde un sonido determinado) de Egipto y de las culturas orientales. En los jeroglíficos el orden de las imágenes representa sonidos hablados además de los objetos de la naturaleza. El simbolismo más abstracto de las lenguas alfabéticas modernas con el tiempo fue substituyendo a muchas lenguas jeroglíficas. Gritos de aviso, gruñidos comunicativos y garabatos con un significado propio reforzaron la supervivencia de los comunicadores. Símbolos comunes reunían a comunidades humanas alrededor de tótems animales, imágenes religiosas y otras piezas de naturaleza abstracta. Los egipcios tenían un dios llamado el Planificador, y es razonable suponer que los cazadores-recolectores estaban trazando mapas e imaginando el movimiento de los planetas y las estrellas hace ya 40 000 años.

El ser humano ya había explorado y se había asentado en el viejo continente hace unos 30 000 años. En Argelia, en un lugar llamado «Asentamiento 34 de Afalou-Bou-Rhummel», se han hallado esqueletos cerca de herramientas constituidas por una cultura neandertalense franco-germana. Las herramientas estaban hechas de fragmentos de obsidiana, un vidrio natural de color negro y de origen volcánico. Afiladas para darles la forma de hachas de mano o de puntas de lanza dentadas, se las considera como pertenecientes al Paleolítico o Antigua Edad de Piedra. En Boskop (Africa del Sur) se encontraron fragmentos de esqueletos humanos (una mandíbula y algunos

trozos de huesos de las extremidades) junto con herramientas.

En Predmost (Moravia) se encontraron enterrados directamente bajo tierra los restos de unas treinta personas. Ese tipo de enterramiento era intencional porque, acompañando a los muertos, se dejaban herramientas hechas de hueso y cuerno. En el sur de Francia y en el norte de España, en las paredes del fondo de húmedas cuevas de piedra caliza casi inaccesibles, se encuentran imágenes de brujos semidioses y animales semihumanos que son el legado de culturas ricas en arte y misterio.

Quizá las más famosas pinturas rupestres sean las de Altamira, en España, y las de Lascaux, en Francia. En conjunto, la edad media de las cuevas del occidente de Europa va de los 40 000 a los 10 000 años de antigüedad. Las pinturas varían desde cazadores estilizados hechos con trazos finos a grandes animales extinguidos representados elegantemente. Algunas muestran osos sin cabeza y grandes bóvidos. Para llegar hasta el lugar donde se encuentran las pinturas, los artistas y los espectadores tuvieron que arrastrarse por galerías de techos bajos y recorrer serpenteantes caminos cargados probablemente con antorchas o alguna otra fuente de luz. Los tres hermanos espeleólogos franceses que descubrieron la cueva que su padre bautizó como «de los Tres Hermanos», tuvieron que recorrer un río subterráneo para hacer aquel maravilloso descubrimiento.

En el fondo de las paredes más remotas de la cueva los exploradores encuentran las marcas dejadas por antiguos artistas. Los visitantes modernos contemplan ojos pintados en los techos con pigmentos de óxido de zinc hace miles de años. Esas pinturas indican por ellas mismas la presencia del moderno *Homo sapiens* en la Tierra. Solamente el ser humano pinta, solamente el ser humano planea expediciones ceremoniales hasta el fondo de húmedas cuevas oscuras. Solamente el ser humano entierra sus muertos con pompa. La búsqueda de nuestro antepasado histórico es la búsqueda del narrador y del artista.

Las llamadas razas modernas humanas aparecieron tan recientemente que no pueden discernirse en una línea temporal que incluya el origen de la vida. Continuamente se exageran

las diferencias entre europeos, africanos, americanos nativos, vietnamitas, esquimales y todos los pueblos de la Tierra. Considerando que tenemos un padre y una madre, cuatro abuelos, ocho bisabuelos y así sucesivamente, y que una generación son unos veinticinco años, lo que hace cuatro generaciones por siglo, llegamos a la conclusión de que en cuarenta mil generaciones habríamos acumulado $2^{40\,000}$ antepasados. Este número es mucho mayor que el número total de personas que han existido hasta la actualidad y supera, con mucho, los cálculos más radicales que los antropólogos han hecho de la población humana mundial de hace un millón de años. Si asumimos que nuestros antepasados estaban vivos hace diez mil años, este cálculo sólo puede significar que muchos de los parientes por parte paterna —en realidad la mayoría— serían los mismos que por parte materna. Esto significa, además, que ya se trate de chinos o africanos, ingleses o dravídicos, nuestros antepasados son los mismos.

Los humanos modernos parece que se dispersaron desde el centro y el oeste de Asia hacia Borneo, Australia y Europa oriental. Hace 35 000 años estaban ya en Europa occidental; hace 32 000 años habían alcanzado la cuenca del Lena, en Siberia, y el Zaire, en Africa; hace 27 000 estaban en Namibia y quizás en el noroeste del continente americano: hace 19 000 años los amerindios habían alcanzado Pennsylvania; y otros amerindios se habían extendido hacia las zonas más alejadas de Sudamérica hace ya 10 500 años.

Con un volumen craneal de más de 1500 centímetros cúbicos y su propensión a la vida tribal, a la poesía, a la argucia, todos los seres humanos actuales se parecen más entre sí que cualquiera de nosotros al *Australopithecus afarensis* o al *Homo erectus.* Sin embargo, la continuidad desde los hombres-mono del Pleistoceno hasta nosotros puede detectarse a grandes rasgos en los fósiles. Reconstruimos nuestra historia científica a partir de los huesos de las mandíbulas, de los cráneos aplastados de presas, de herramientas de piedra y de sorprendentes pinturas. La evolución humana nos proporciona un hermoso ejemplo de darwinismo clásico. En nuestra especie, como en cualquier otra, los cambios en las poblaciones se dan

a lo largo del tiempo como respuesta a las presiones de selección. Se pueden seguir los cambios desde los primates que comían insectos, fruta fresca y frutos secos hasta aquellos que practicaban la caza mayor y fabricaban bastones afilados y hachas. Pero la obtención de más pistas ha dificultado, en vez de facilitarla, la diferenciación de los distintos niveles en la transición desde los pequeños mamíferos nocturnos que vivían en árboles hasta los homínidos capaces de andar sobre dos patas. Hay una cierta continuidad que lleva desde los pequeños monos del Mioceno hasta el *Homo sapiens sapiens* pasando por los australopitecinos del Plioceno, el *Homo erectus* y el *Homo sapiens neanderthalensis.*

Durante el periodo interglaciar Riss/Wurm (el anterior al periodo interglaciar en que vivimos ahora) abundaron los restos fósiles de homínidos. Especialmente en Europa, pero también en el Oriente próximo, sudeste asiático, Zambia y China se han hallado enigmáticos restos de hombres y mujeres. La «localidad tipo» o lugar donde se encontraron por primera vez fue Neanderthal, un valle cercano a Dusseldorf, que tomó su nombre del compositor del siglo XVII Joachim Neander.

Los neandertalenses se distinguían por su cráneo; el volumen medio de los especímenes conocidos excede al del hombre moderno, pero aparentemente con dimensiones equivocadas. El cráneo de Neanderthal, con una cara sin apenas mentón, es prominente no por arriba, sino por la parte posterior. Los neandertalenses tenían las manos pequeñas y rechonchas y probablemente dedos fuertes y peludos. Aparte de cualquier otra cosa, eran seres humanos: eran artistas y poetas y enterraban a los muertos.

Hace 35 000 años los neandentalenses fueron sustituidos en Europa por individuos tan parecidos físicamente a las personas actuales que nadie se pararía a mirarlos en el metro de Nueva York. Los neandertalenses podrían haberse extinguido sin dejar descendencia. Hay quien cree que poco a poco originaron el moderno hombre de Cro-Magnon europeo (el *Homo sapiens*

sapiens). Y algunos creen que el hombre de Cro-Magnon luchó contra el de Neanderthal y le venció, dejando descendientes híbridos que se convirtieron en los modernos hombres europeos. También existe la hipótesis de que descendemos de los neandertalenses, que no son muy diferentes del ser humano actual. Las sobresalientes y pesadas cejas y mandíbulas, su posición encorvada y piernas gruesas, serían el resultado de diferencias hormonales de importancia menor.

De la misma manera que la baja estatura, las piernas arqueadas y los brazos delgados caracterizaban a los naturales de la tierra del Fuego estudiados por Darwin y dibujados por Robert Fitzroy durante el viaje del *Beagle* en 1830, podría ser que el tipo físico de Neanderthal haya sido tan sólo una «raza» de la antigua población humana. Los híbridos procedentes del cruce entre los neandertalenses y los de Cro-Magnon podrían haber cambiado el aspecto extremado del hombre de Neanderthal por otro que nos resulta más familiar. Si *Lucy* apareciese vestida y no se le viera la cara con claro aspecto de chimpancé, se la podría tomar por una viejecita encogida. *Homo habilis* pasaría por un hombre seriamente afectado por la artritis y *Homo erectus* parecería algo jorobado. Pero los neandertalenses y los cromañones son como nosotros a todos los efectos. Al terminar de contar la historia de los pueblos del Pleistoceno contamos nuestra propia historia. La cuestión entonces es la siguiente: si hemos estado por ahí realizando pinturas murales y diseñando artefactos desde hace como mínimo unos 30 000 años, ¿cuánto tiempo pasará antes de que el *Homo sapiens sapiens* se convierta en algo distinto? ¿Cuándo nos mirarán nuestros futuros descendientes como a *sus* ingenuos predecesores?

Naturalmente, no hay respuesta concreta para ello. Tanto los paleontólogos especializados en invertebrados, que estudian los restos fósiles de animales marinos, como los especializados en vertebrados, que estudian fósiles de peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos, han llegado a la conclusión de que las especies distinguibles de animales vertebrados que dejan fósiles claramente identificables suelen persistir aproximadamente un millón de años. Puede decirse que el ser humano, como *Homo sapiens sapiens*, tiene al menos 100 000 años de antigüedad. Aún tenemos, por consiguiente, más de medio millón de años por delante.

Se puede creer que el ser humano vivirá siempre. Pero la idea de que ya no esté sujeto al proceso evolutivo es tan irracional como creer en Papá Noel o en el ratoncito Pérez. Podemos estar casi seguros de que, dentro de aproximadamente un millón de años, nuestra especie será sustituida por una o dos especies descendientes nuestras, o por ninguna. Esto es lo que cabe esperar basándose en el conocimiento que hemos acumulado sobre *todas* las demás especies.

Nuestros antepasados, con su especial don para la cultura, llegaron a un escenario microbiano iniciado hacía mucho tiempo. La pátina planetaria, la capa bacteriana subyacente, se había extendido y había crecido hasta alcanzar proporciones macrocósmicas. Los primeros pueblos se extendieron desde su punto de origen aparente en el Edén tropical africano del viejo continente. Los monos-hombre se expandieron como *Homo erectus* y *Homo habilis* hace más de medio millon de años; sus descendientes, *Homo sapiens*, se dispersaron en gran número desde el centro de Asia hace más de 50 000 años. Con sus trajes cálidos y sus casas, con la vasta ramificación de sus habilidades para pensar y trabajar juntos en colectivos sociales, nuestros antepasados procrearon y crearon, dominaron y predominaron. Aprendieron a seleccionar y cultivar plantas, a ser más listos y a enseñar a otros. Se convirtieron en mamíferos cada vez más cerebrales y sociales. Aprendieron a santificar con ceremonias la transferencia de información a sus hijos. Hicieron todo esto con los sistemas abstractos y simbólicos del arte, el lenguaje, la magia, la escritura, la religión, la lógica y —empezando hace al menos 2600 años con Tales, en Grecia— la ciencia.

Cuando apareció, el ser humano navegó hacia la inhóspita costa de lo que hoy es Nueva Inglaterra; cruzó los estériles desiertos de Arabia; remó y trepó hasta lo alto de los profundos fiordos escandinavos; navegó en canoa hasta las inaccesibles islas del océano Pacífico; y, finalmente, voló hasta los helados casquetes polares. Cuando surgió, el ser humano se

esparció por doquier. Sin embargo, aparte de nuestra fecundidad, persistencia, imaginación y verbosidad, poca cosa hay de grandioso y diferente en *Homo sapiens sapiens.* Algo así como una mala hierba entre los mamíferos, con todo nuestro talento y personalidad, no somos más que el resultado de eones de recombinación microbiana. Con mitocondrias respiradoras que convierten el oxígeno en energía y unos sistemas de motilidad que se han modificado para procesar la información sensorial que les llega del exterior, nos parecemos a cualquier otro animal. Podemos alardear de que las pinturas rupestres en Lascaux fueron ejecutadas por esta rara especie que seguramente bajó de los árboles y se puso de pie, mirando la Luna. Pero esto es adoración heroica, antropocentrismo. En realidad, podemos perdonarlo; pero sería más objetivo situar los mismos hechos de otra manera: unas comunidades del *microcosmos* que poseen mitocondrias respiradoras y agentes secretos espiroquetales que dividen sus células, se posaron (aunque por poco tiempo) en la Luna.

La expansión extraterrestre del antiguo micromundo ya ha empezado. Pero esto no significa que nosotros seamos algún tipo de especie escogida. Lo cierto es que algunos científicos creen que nuestro fantástico éxito reciente en la colonización del planeta es un fenómeno que marca nuestra decadencia: las luces esplendorosas antes del final inevitable del espectáculo. Como sugiere el biólogo A. Meredith, el modelo de aparición súbita, expansión y posterior desaparición en el registro fósil tiene muchos precedentes históricos y es mala señal. La lección del pasado fósil advierte que las formas de vida superficiales que consiguen un gran éxito a menudo se encuentran en el límite de su agotamiento biológico. Históricamente, las especies que están a punto de extinguirse suelen reproducirse con gran profusión. Las numerosas especies de arqueociátidos y trilobites del Cámbrico y de dinosaurios del Cretácico son testigos de este proceso desfavorable, que Meredith llama «devolución». Como ya percibió Charles Darwin, los organismos se adaptan a su medio ambiente debido a las pruebas constantes en su tendencia hacia el crecimiento ilimitado. Si no consiguen adaptarse pueden disminuir en número y extinguirse. Pero, según Meredith, *también* pueden adaptarse demasiado, multiplicarse, agotar sus recursos y extinguirse *entonces.*

Un ejemplo microcósmico de devolución serían los microorganismos que crecen en una placa de Petri. (Las placas de Petri son unos recipientes de cristal transparente, redondos y de muy poca altura, constituidos por una base y una cubierta algo mayor, que encajan al cerrar. En la base se dispone un medio de cultivo transparente y claro que permite al investigador distinguir las colonias microbianas como manchas visibles a simple vista.) Alimentadas con agar nutritivo (alimento bacteriano al que se da consistencia añadiendo una sustancia gelatinosa extraída de algas marinas), los microorganismos a menudo son más prolíficos en las generaciones que preceden a su colapso. Al consumir todos los nutrientes que se encuentran en el agar y llegar a los límites de la pequeña placa, los miles de millones de bacterias de repente dejan de crecer y mueren por falta de alimento y de espacio vital. Para nosotros, el mundo puede ser como una placa de Petri. En realidad, las imágenes de Spokane (Washington) obtenidas por satélite muestran modelos de crecimiento urbano similares a los del crecimiento de las colonias de microorganismos. Desde el punto de vista de la teoría de la devolución de Meredith, es fácil ver que las implicaciones del crecimiento de las poblaciones humanas no son necesariamente sinónimo de progreso.

Si aceptamos que no somos superiores a otros organismos sino iguales a ellos —en realidad, combinaciones distintas de los mismos antepasados microbianos—, podríamos desear volver atrás e inculcarnos de nuevo un poco de orgullo. Evolución es aceleración. El antiguo microcosmos bacteriano parece encontrarse a punto de experimentar los cambios más importantes de su historia. (Aunque actualmente esos cambios se producen por intervención de los humanos, hay pocas garan-

tías de que vayamos a continuar siendo sus causantes en el futuro.) Para empezar, los saltos tecnológicos producidos desde la segunda guerra mundial han sido sorprendentes. John Platt, teórico de sistemas generales en Cambridge (Massachusetts), ha estudiado y ha contribuido a formular el fenómeno de la aceleración evolutiva.[48]

Platt cree que la vida en la Tierra está alcanzando «su punto más crítico en 4000 millones de años». Esboza una serie de rígidas comparaciones, en un número de zonas, entre la vida primitiva y la tecnología del presente. La impresión es la misma en todas partes: el microcosmos, como nosotros, está avanzando con ímpetu tan rápidamente que es imposible decir qué puede pasar incluso en un periodo de tiempo geológicamente corto. Consideremos primero la evolución en sí misma. En evolución, los efectos caprichosos del cruce sexual pueden ser ahora imitados y dirigidos de manera consciente con las técnicas de la biología molecular y gracias al DNA recombinante. Para Platt se trata de un adelanto más importante que la domesticación y la cría de animales y ve las ramificaciones biotecnológicas «desplegándose durante miles o millones de años».

En la conversión de energía, Platt detecta una progresión directa que, desde la fotosíntesis (hace 2000 millones de años), pasa por el consumo de vegetales en la alimentación (hace aproximadamente 1000 millones de años), el uso del fuego (hace unos 400 000 años), la agricultura y producción de alimento (hace 10 000 años) y llega hasta los métodos más modernos de la liberación de la energía que, capturada por fotosíntesis, se encuentra en el carbón y en el petróleo. La vida se ha vuelto más astuta en la era presente: las células fotovoltaicas ofrecen una vía directa de aprovechamiento de la energía solar, mientras que la fisión y la fusión pueden reproducir el tipo de reacciones atómicas que se dan en el Sol para producir energía a partir de la materia en primer lugar.

También pueden identificarse los adelantos hechos por la vida para encapsularse y desplazarse hacia nuevos hábitats. El camino arranca con las primeras células que vivían en el

agua. Entonces la vida multicelular emergió hacia tierra, protegida por cubiertas tales como caparazones, piel y corteza, hace unos 600 millones de años. El uso de vestidos y otros artefactos permitió a las personas desplazarse hacia todos los climas para establecer ciudades en todos los continentes durante los últimos milenios y, desde hace 600 años, el traslado de la «frontera» por el oeste. La complicación cada vez mayor de los hábitats ha alcanzado su máximo en lo que Platt llama la «transformación presente» de las expediciones preliminares al espacio, a las zonas polares constantemente heladas y al interior de la tierra y los mares (siempre en las cápsulas apropiadas para cada caso, que van desde los pozos de las minas a los vehículos espaciales o los submarinos). El último ejemplo más extremado de complejidad del hábitat podría ser «Biosfera II», un ecosistema materialmente cerrado, pero abierto desde el punto de vista de la energía y la información (en el que un grupo de científicos han estado viviendo entre 1990 y 1992 cerca de Oracle, Arizona). Además de realizar estudios sobre la Tierra, esta estructura servirá como prototipo para naves y estaciones espaciales capaces de reciclar sus propios residuos, lo que les permitirá no depender de recibir materiales enviados desde la Tierra.

Los métodos de viajar, naturalmente, han ido progresando desde el impulso celular y las espiroquetas (hace 3000 millones de años) hasta los sistemas musculares tales como aletas, pies y alas (hace 300 millones de años). Las distintas modalidades de transporte humano probablemente empezaron con las barcas (hace 50 000 años), extendiéndose a la utilización del caballo y los carros con ruedas (hace 5000 años.). Aquellos sistemas se han complementado en los últimos doscientos años con los modernos ferrocarriles, automóviles y aeroplanos, a los que han seguido los reactores y cohetes reutilizables, como la lanzadera espacial, en el último periodo que data desde finales de la segunda guerra mundial. Las herramientas y armas ha progresado desde la fase química del macrocosmos primitivo y, pasando por los dientes y garras de la vida animal (hace aproximadamente 600 millones de años) y las máquinas, fusiles y explosivos del periodo moderno, han llegado

hasta las temibles armas nucleares, programables y de control remoto, de la transformación presente.

Cuando sobrepasamos el reino físico del artefacto, o soporte biológico (hardware), y llegamos a lo que podría llamarse proceso de información o soporte lógico (software), los saltos son aún más sorprendentes. Por ejemplo, puede detectarse un enorme progreso en los sistemas de percepción.

Las bacterias con magnetotactismo, que llevaban en su interior diminutas barras de magnetita, nadaban hacia el norte (hacia el polo norte magnético) en el hemisferio norte y hacia el sur (hacia el polo sur magnético) en el hemisferio sur hace cientos de millones de años. Los sistemas químicos bacterianos de detección y señalización de hace 3500 millones de años se complementaron en los protistas con la formación y procesado de una imagen celular hace unos 1000 millones de años. No hay ninguna duda sobre la existencia de ojos con capacidad de visión en dos diferentes protistas dinomastigotos como mínimo, *Neodinium* y *Erythrodinium.* Con sus análogos de lentes y retinas, esos ojos unicelulares están al acecho de sus enemigos submarinos. Los sistemas orgánicos del olfato, el oído, el tacto, la sensibilidad a la electricidad y la detección por eco ya habían alcanzado un buen desarrollo hace 100 millones de años en algunos animales. El progreso en la percepción continuó con el habla en los humanos primitivos hace aproximadamente un millón de años, siguió con la escritura en el momento que se ha considerado tradicionalmente el despuntar de la civilización hace varios miles de años, el teléfono y la radio en una fase más cercana y ha alcanzado la exploración preliminar del espectro electromagnético, incluyendo inventos como el radar, el láser y la televisión.

Puede que sean más importantes dos series de saltos finales que la vida ha dado en cuanto a resolución de problemas y su almacenamiento y en cuanto a mecanismos de cambio. Como estas dos áreas presentan puntos en común, las trataremos conjuntamente.

La resolución de problemas empezó hace 4000 millones de años por medio de cadenas de DNA procariótico capaz de recombinarse y mutar. La selección natural, al proteger a las

bacterias y a sus descendientes con la más efectiva de las respuestas al medio ambiente, almacenó soluciones para los problemas de exceso de temperatura, sequía y radiaciones ultravioleta. La forma de almacenamiento fue por medio de secuencias informativas de ácidos nucleicos y la capacidad de estos ácidos nucleicos, RNA y DNA, para interaccionar con proteínas en la vecindad inmediata. La transferencia de replicones, como se ha explicado en el capítulo 5, permitió utilizar la cantidad cada vez mayor de información que se había almacenado, desde el origen de la vida, en las secuencias de aminoácidos y pares de bases de aquellas substancias químicas de cadena larga.

Hace unos 700 millones de años la evolución de los primeros sistemas nerviosos y cerebros alcanzó el nivel del aprendizaje y el pensamiento, que era una manera más rápida de resolver los problemas y funcionaba a nivel individual. Esta nueva forma neuronal de resolución de problemas no utilizaba los métodos darwinianos de muerte individual o de intercambio genético, sino métodos asociados al psicólogo B.F. Skinner, es decir, por medio de modificaciones del comportamiento. En vez de almacenarse en el DNA, el comportamiento variable y el refuerzo selectivo obtenidos a partir del medio ambiente se almacenaba en interacciones selectivas entre células excitables o neuronas, que responden directamente al medio ambiente. (Como hemos visto en el capítulo 9, los sistemas nerviosos pueden basarse en la locomoción bacteriana en última instancia.) Desde la fase humana primitiva hasta hoy el cerebro ha triplicado su tamaño, con una tasa de crecimiento casi del cien por cien cada millón de años.

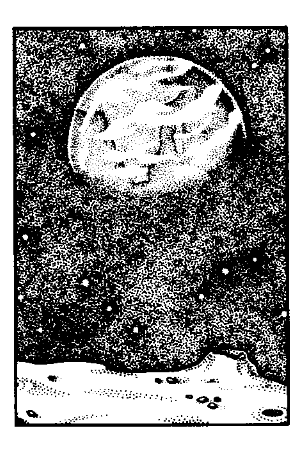
Un salto posterior en la resolución de problemas fue la ciencia, que se atribuye a los griegos de hace tan sólo 2600 años. Pero la esencia de las leyes generales que formulan la manera de funcionar el mundo probablemente se remonta hasta el primer *Homo sapiens sapiens,* hace 50 000 años. La ciencia se ha convertido en un método social de investigación de los fenómenos naturales, haciendo exploraciones intuitivas y sistemáticas de las leyes que se formulan al observar la naturaleza y probando de manera rigurosa su veracidad en forma de pro-

nósticos. Los resultados se almacenan entonces como registros escritos o matemáticos que son copiados y difundidos por otras personas dentro, y más allá, de una determinada generación. Como una especie de percepción de grupo sinérgica y regulada de manera rigurosa, la empresa colectiva de la ciencia trasciende con mucho la actividad del propio cerebro individual.[49]

La aplicación práctica de la ciencia es la investigación y el desarrollo, con productos como el diseño de la bomba atómica, el aterrizaje del hombre en la Luna, de la llamada iniciativa de defensa estratégica, que consistiría en formar una capa protectora de láser sobre el territorio de los Estados Unidos, y de las estaciones espaciales en órbita terrestre con ríos y jardines. (Los últimos ejemplos, naturalmente, están aún en la fase de proyecto.) Como escribe Platt: «Hoy en día el manejo de la nueva información se encuentra en el corazón de la ciencia, la tecnología, la guerra, la banca, los negocios, los estudios sociales y cada vez más en nuestra vida diaria. Es como un sistema nervioso social y colectivo para tratar millones de problemas nuestros y su importancia en el futuro a largo plazo puede ser tan grande como la de los primeros sistemas nerviosos de aprendizaje». Platt caracteriza la investigación a gran escala y el desarrollo, el gasto de hasta el uno por ciento del producto nacional bruto, como un proceso de «saltos evolutivos inventivos y podría ser un salto tan grande como la evolución original del pensamiento mismo».

Mirando estos ejemplos de aceleración evolutiva, no podemos evitar sentir respeto y temor. Algunos fenómenos que empezaron en el oscuro abismo del eón Arqueozoico parecen haberse extendido y aumentado su inercia durante 4000 millones de años. Estos procesos son la coincidencia parcial, la convergencia, la alimentación y el préstamo entre unos y otros. Como los simbiontes del microcosmos, pueden reproducirse y recombinarse para llegar a ser algo más que la suma de sus partes constituyentes. Pero sólo retrospectivamente será posible determinar si la evolución observada por Platt era un requisito previo para cosas mayores o simplemente un hermoso fenómeno de decadencia, el final «devolutivo» de Meredith. Nosotros tomamos una vía intermedia y creemos que la humanidad es en realidad una fase, pero importante, que se incluirá en formas futuras de organización de la vida.

13
El futuro supercosmos



Como un adulto cuya personalidad se hubieran formado en sus grandes rasgos en una infancia olvidada, la humanidad, y su lugar en la historia, pueden ser comprendidos únicamente a medida que exploramos y conseguimos descifrar el misterio de nuestro pasado celular. Animales y vegetales son modelos de células con núcleo. A pesar de que sus células nucleadas proceden de bacterias simbióticas del microcosmos, han constituido también los seres que formamos parte del macrocosmos. La vida que actualmente puebla la Tierra deberá evolucionar para poder vivir en otros planetas o, tal vez, alrededor de otros soles. Y si sobrevivimos, deberemos sin duda cambiar, llegar a ser parte del futuro «supercosmos»: la hipotética expansión continua de vida desde la Tierra por el sistema solar e incluso más allá. El enorme aumento de la superficie y recursos disponibles liberará todo el potencial de la vida y el supercosmos llegará a ser tan distinto de nuestro mundo actual como nosotros lo somos de las bacterias.

Dado que ostentamos el monopolio de la alta tecnología en el reino animal, los humanos somos los más firmes candidatos para expander la vida a través del sistema solar, e incluso más allá. Pero no es un hecho consumado que los seres humanos sean los agentes últimos de la expansión del microcosmos en el espacio. Por ejemplo, el procesado de la imagen visual por medio de ojos ha evolucionado muchas veces; se

desarrolló en los protistas, en gusanos marinos, en moluscos (caracoles y calamares, por ejemplo), en insectos y en vertebrados. Estructuras aladas se han desarrollado de manera independiente en insectos, reptiles, aves y murciélagos; se trata de diseños aerodinámicos similares que surgieron para afrontar unos mismos problemas aerodinámicos. Esta tendencia de los organismos a evolucionar en direcciones semejantes a pesar de que sus antepasados recientes sean diferentes se denomina convergencia. Y es la convergencia lo que hace pensar que muchos tipos de organismos se propagarán por el espacio, de igual manera que muchos seres muy diferentes lo hicieron por tierra firme y por la atmósfera. No obstante, al igual que los peces pulmonados, que salieron del agua pero nunca evolucionaron hacia formas predecesoras de los animales terrestres, nuestros devaneos con el espacio es posible que no se consumen nunca con la prolongación de la vida allí. La existencia de un sistema nervioso y de un comportamiento social en muchos grupos de animales hace pensar que si el ser humano fallase, otras formas de vida evolucionarían para transportar el microcosmos primordial hacia el espacio. Si la especie humana llegara a extinguirse o si, como las cacerolas de las Molucas o los peces pulmonados, quedase tanquilamente recluida en su hábitat actual, la biota terrestre podría mantenerse durante algún tiempo confinada en la Tierra. Pero pensemos que la evolución de los homínidos se ha realizado en tan sólo unos pocos millones de años. Aun considerando que todos los antropoides (seres humanos y monos) se extinguieran, el microcosmos abundaría en recursos como el sistema nervioso u otros apéndices capaces de manipular, semejantes a aquellos en los que se apoyó la evolución para conseguir por primera vez el desarrollo de la inteligencia y de la tecnología. En ausencia de seres humanos, si se diera a los mapaches (inteligentes mamíferos nocturnos con una buena coordinación manual) el tiempo suficiente para evolucionar, sus descendientes podrían organizar su propio programa espacial. Tarde o temprano es probable que la biosfera se expanda más allá de su cuna, la Tierra.

Es una característica muy reveladora del microcosmos que los fenómenos geológicos explosivos del pasado *nunca* hayan causado la destrucción *total* de la biosfera. En realidad, como en el caso de aquellos artistas cuyas desgracias sirven de catalizadores para la creación de hermosas obras de arte, las innovaciones evolutivas más importantes han estado inmediatamente precedidas por grandes catástrofes.

La vida en nuestro planeta responde a las amenazas, heridas y pérdidas con innovaciones, crecimiento y reproducción. La desastrosa pérdida del hidrógeno, tan necesario para mantener el campo gravitatorio de la Tierra, condujo a una de las mayores innovaciones evolutivas de todos los tiempos: la utilización del agua (H_2O) en la fotosíntesis. Pero también originó una tremenda crisis de contaminación: la acumulación del oxígeno, que en un principio era tóxico para una gran mayoría de seres vivos del planeta. Sin embargo, la crisis de oxígeno que se experimentó hace unos mil millones de años causó la evolución de las bacterias respiradoras, que utilizaron el oxígeno para producir energía bioquímica, con un rendimiento superior al de cualquier sistema productor de energía anterior. Se trataba de bacterias simbióticas que se unieron a otras bacterias para formar las células eucarióticas, las cuales se hicieron multicelulares y dieron origen a hongos, plantas y animales. La peor extinción en masa que haya ocurrido en la Tierra tuvo lugar en el límite Permotriásico, hace unos 245 millones de años. A continuación se produjo el rápido ascenso de los mamíferos, provistos de una vista aguda y un cerebro grande y receptivo. La catástrofe del Cretácico, incluyendo la desaparición de los dinosaurios hace unos 66 millones de años, abrió el camino para el desarrollo de los primeros primates, cuya intrincada coordinación de ojos y manos condujo a la tecnología. La segunda guerra mundial introdujo el radar, las armas nucleares y la era electrónica. Los holocaustos de Hiroshima y Nagasaki en 1945 diezmaron la industria y la cultura japonesas, entreabriendo inconscientemente una vía para el inicio de una nueva era de dominio en la forma del sol naciente del imperio informático japonés.

Con cada crisis, la biosfera parece retroceder un paso y avanzar dos. Los dos pasos hacia adelante son una solución evolutiva que sobrepasa los límites del problema original. Al superar los retos a los que ha de hacer frente, la biosfera confirma su notable capacidad de adaptación; se recupera de las tragedias con un vigor renovado. Una conflagración nuclear en el hemisferio norte mataría centenares de millones de seres humanos. Pero no representaría el fin de la vida sobre la Tierra y, aunque parezca despiadado, un Armagedón humano podría preparar la biosfera para unas formas de vida menos centradas en sí mismas. Tan diferentes de nosotros como nosotros mismos lo somos de los dinosaurios, esos seres futuros podrían evolucionar a través de la materia, la vida y la consciencia hasta alcanzar un nuevo nivel de organización superordenado y, al hacerlo, podrían considerar a los humanos tan impresionantes como nosotros mismos consideramos a las iguanas.

No hace falta decir que dicha visión ofrece sólo un consuelo metafísico. Exceptuando el impacto directo de un arma nuclear, que naturalmente sería fatal, bastarían tan sólo diez microgramos, es decir, diez millonésimas de gramo, de lluvia radiactiva (los detritos procedentes de una explosión que, tras alcanzar la estratosfera, se dispersan con el viento y posteriormente se sedimentan) para matar a una persona. A mediados de la década de los ochenta se atribuía a la entonces Unión Soviética y a Estados Unidos unos arsenales nucleares respectivos de 10 000 megatones. Como demostró el inventor Buckminster Fuller dejando caer las fichas de un popular juego parecido al juego de la pulga sobre un mapa gigante extendido en la pista de la sala de baile del hotel Sheraton de Nueva York, 5 000 bombas dejadas caer al azar sobre el planeta paralizarían los mayores núcleos de población de la Tierra. Y dados los arsenales actuales (en oposición a los proyectados para el futuro), una guerra nuclear a gran escala podría eliminar del 30 al 60 por ciento de la capa estratosférica de ozono. El polvo y el humo de los incendios de las ciudades se elevaría y rodearía la Tierra, primero haciendo aumentar la temperatura media del planeta y después haciéndola descender

con consecuencias devastadoras. La radiación podría causar también epidemias mundiales de enfermedades parecidas al sida debido a su acción sobre el sistema inmunitario humano. Sin embargo, y a pesar de todo esto, dudamos que la salud conjunta y la estabilidad subyacente del microcosmos se viese afectada. El aumento del número de mutaciones inducidas por radiación no produciría un efecto directo en la evolución de los microorganismos, ya que siempre existe una gran reserva de mutantes resistentes a las radiaciones que pueden incorporarse al proceso evolutivo. Por ejemplo, *Micrococcus radiodurans* se ha encontrado en el agua utilizada para enfriar los reactores nucleares. Como tampoco se vería afectada la capa bacteriana por la destrucción de la capa de ozono y la subsecuente entrada en la atmósfera de torrentes de radiaciones ultravioletas. Al contrario, lo más probable es que aumentase, ya que la radiación estimula la transferencia de genes entre bacterias.

En el relato de ciencia ficción «El dios microcósmico»,[50] de Theodore Sturgeon, un brillante científico que no se conforma con «examinar el futuro superficialmente, sino que se adentra en él» cuando ve algo interesante, consigue inventar la vida en el laboratorio. Estas formas de vida, los «neotéricos», que repiten el camino evolutivo desde los microorganismos a los seres sociales más inteligentes, tienen un tiempo de generación extraordinariamente rápido. Los neotéricos evolucionan cada vez más deprisa a medida que su creador los somete a pruebas de dificultad creciente. Finalmente, cuando organizan su propia representación y se comunican con el inventor mediante un sistema que ellos mismos han diseñado, el científico los somete a una prueba final, que logran superar. Al introducir en la cámara donde se encuentran trazas de óxido de aluminio y de otros compuestos químicos, aquellos seres en miniatura transforman las moléculas en sólidos pilares de metal puro. Eso evita que las paredes de la jaula que constituye su hábitat caigan sobre ellos. Finalmente, los neotéricos se aíslan del mundo exterior con un material impenetrable y desconocido. Ni siquiera su propio inventor puede volver a establecer contacto con ellos.

Esta historia nos ofrece una metáfora de la actual situación de la humanidad. Los ensayos y tribulaciones evolutivos han estimulado la aparición de criaturas maravillosas y extrañas, cada una más sorprendente que la otra, según hemos visto. El reto natural que representaron las glaciaciones para nuestros antepasados, aquellos simios tropicales, ha perfilado recientemente la inteligencia en su forma humana. Sin embargo, y a juzgar por el aumento apocalíptico del número de armas para la destrucción en masa, esta inteligencia podría ser autolimitante. La producción acelerada de armas (que con el tiempo podrían llegar a destruir a sus propios constructores) es una historia que se repite muchas veces en el devenir de la biosfera.

La naturaleza acelerada de la evolución en general y de la evolución cultural en particular hacen imposible predecir las futuras innovaciones evolutivas, especialmente las de largo alcance. Si nos limitamos a extrapolar las tendencias actuales, llegaremos no al futuro, sino a una caricatura del presente. Por ejemplo, cuando se inventó el teléfono, se dijo que en un futuro no muy lejano todas las ciudades y aldeas podrían disponer de uno. Por otra parte, cuando se inventó el helicóptero se llegó a imaginar que algún día todas las casas fuera de las ciudades tendrían uno en su propio helipuerto. Algunos científicos muy respetables pronosticaron que la superficie de la Luna estaba cubierta de petróleo en cantidades comercialmente explotables. Y eso lo escribieron en revistas serias, apoyándose en referencias completas de la bibliografía profesional y utilizando complicadas ecuaciones. También indicaron que uno de los hemisferios del planeta Marte estaba casi completamente cubierto por unos líquenes que se volvían verdes en verano. Otros científicos predijeron la existencia en la Luna de una capa de polvo tan gruesa que haría imposible el alunizaje. Por tanto, no queremos aparentar un conocimiento particular del futuro, sino más bien discutir las posibilidades que se basan en el conocimiento de gran parte del pasado.

Más allá de las novedades a corto plazo están las tendencias de la vida a largo plazo (extinción, expansión, simbiosis), que parecen universales. Nosotros, la especie *Homo sapiens,*

acabaremos extinguiéndonos, con guerra nuclear o sin ella. Podemos, como los ictiosaurios, los helechos con semillas o los australopitecinos, dejar los anales de la historia de la Tierra sin ningún heredero. O podemos, como los coanoflagelados o el *Homo erectus,* antepasados respectivos de las esponjas y de nuestra especie, evolucionar hacia nuevas especies distintas.

Sin embargo, no importa hacia qué formas evolucionen o involucionen nuestros descendientes; si se mantienen en la Tierra, acabarán quemados vivos. Todos los cálculos astronómicos indican que el Sol tiene vida sólo para unos diez mil millones de años. Cuando haya utilizado como combustible todo el hidrógeno primitivo a su alcance, se producirán reacciones nucleares que romperán átomos más pesados, como los de helio. A medida que desprenda radiaciones y se expanda hasta llegar a ser un gigante rojo, nuestra estrella agonizante brillará como no lo ha hecho nunca antes. En su luminosidad, el Sol generará un calor inmenso, que hará hervir y evaporarse los océanos de la Tierra, destruyendo la atmósfera y fundiendo la superficie granítica y las rocas basálticas. Es de suponer que entonces a nuestro Sol se le acabará el combustible. En sus últimas fases, el Sol se encogerá hasta un tamaño centenares de veces inferior al actual por efecto de la gravedad, convirtiéndose en una densa enana blanca, un minúsculo rescoldo ya consumido en el vasto y ardiente universo.

Ese desastre nuclear natural podría ser el fin de nuestra forma de vida en la Tierra; la prueba última y sin solución a la que se someterían esta molécula genial que es el DNA y nuestra especie humana, si es que aún sigue viva en una u otra forma por entonces. Esta explosión tan normal de una estrella también normal ¿podría causar la desaparición de nuestra tan extraordinaria evolución microcósmica? ¿O hay alguna alternativa, alguna base científica sólida en que se pueda fundamentar alguna esperanza?

Cuando la Tierra se destruya, hirviendo sus océanos por los últimos estallidos de un Sol decadente, solamente se salvarán aquellas formas de vida que hayan ido más allá del propio planeta o que se hayan protegido de alguna manera. Hoy en día los organismos de la Antártida y los del Sahara representan los extremos de la vida en la Tierra. Han aparecido porque existe en nuestro planeta una biosfera intermedia fértil, húmeda, soleada y saludable. Los rascacielos y el metro de las grandes ciudades americanas, por ejemplo, no han surgido de manera independiente; son el resultado de una cultura próspera y laboriosa de un grupo de primates, de una civilización alimentada por productos de las granjas del medio oeste y organizada por medio de conexiones informáticas que van desde Los Angeles a Nueva York. Las especies que lograron sobrevivir y reproducirse tras haberse enfrentado a las extraordinarias diferencias entre su medio interno, húmedo y cálido, y un medio exterior frío y seco, lo consiguieron gracias a un trabajo creativo que les llevó mucho tiempo. El lector es un ejemplo de ello. Su medio interno es más parecido al medio acuático tropical de la Tierra del Arqueozoico que a las zonas templadas del hemisferio norte en las que nuestra especie se adaptó inteligentemente por medio de estrategias tales como el vestido y la vivienda. En realidad, con calefacción, duchas de agua caliente y la presencia de filodendros y clorófitos, el medio ambiente de la humanidad es en la práctica lo que ha sido siempre: el bosque africano.

El prototipo de medio ambiente africano ha sido reproducido en todas partes, desde las salas de juntas de Chicago, repletas de ornamentación botánica, dracenas, *Nephrolepsis,* etcétera, hasta el interior de los iglús de los esquimales del noroeste de Canadá, en que la grasa de foca que arde allí, las cálidas pieles de animales salvajes y los cuerpos congregados se unen para producir el mismo efecto. La tierra natal del *Homo sapiens,* como la de las primeras células, se ha desplazado alegremente hacia el centro del océano Atlántico en los cruceros de lujo. Bacterias descendientes de las primeras células penetraron en los hábitats humanos y han llegado incluso a visitar la Luna. Su división en el interior de las naves espaciales, en los trajes y en los cuerpos de los astronautas, nos da una pista de lo complejo que puede resultar para los seres vivos reconstruirse un medio ambiente para sobrevivir en el espacio. La transferencia del hogar paradisíaco de la especie humana se ha conseguido de manera inteligente gracias a

nuestra capacidad de extender por medio de la experiencia acumulada, es decir, mediante la cultura, lo que antes era transmisible únicamente a través de los genes. Y, sin embargo, el irónico resultado final de nuestra inteligencia extragenética es precisamente la conservación posterior de los genes. En la actualidad, la inteligencia parece ser la clave de la supervivencia. Si los seres vivos de la Tierra han de sobrevivir a la muerte del Sol, es necesario que los microorganismos encuentren una morada más segura. ¿No podría nuestra loable capacidad autopoyética, causante de la puesta en órbita del DNA, propagarse más allá de la Tierra, hacia el espacio?

Quizás. Existen muchos precedentes de transcendencia ambiental y, después de todo, seguimos participando en el mismo juego, tan viejo, de las bacterias. Los microorganismos no pudieron adaptarse a vivir en las condiciones extremas de frío, sequedad, falta de aire y aridez que existen en la Luna, como tampoco nosotros nos hemos adaptado al brutal ambiente oscuro, húmedo y frío del invierno escandinavo. Lo que hemos hecho nosotros y las bacterias de que estamos compuestos ha sido más bien manipular ambientes tan dispares de acuerdo con nuestras necesidades. Ayudamos al movimiento rítmico y a la expansión de los límites de la vida en la Tierra. Lo hacemos sin que nos importe el gasto de energía necesario para desplazarse, para cambiar o para crear de nuevo un medio ambiente primitivo. Llevamos los hábitats de nuestros antepasados a las casas de nuestro futuro. La inserción del modelo antiguo de vivienda en las nuevas casas indica un fuerte conservadurismo, un rechazo al cambio fuertemente enraizado o una aceptación del cambio con la condición de que todo permanezca como antes. Una monomanía así por la conservación puede que sea precisamente lo que se necesita para salvar los seres del futuro y, con ellos, la vida misma, del destino fatal de un Sol en explosión. El futuro puede depararnos entonces la metáfora microcósmica final: la de un planeta cuyo destino último es «dividirse».

Estamos viendo ya indicios de la expansión de los límites

de la vida. Poblaciones, industrias, universidades y barrios extremos de las ciudades aumentan rápidamente, pero ninguno ha crecido indefinidamente sin que haya acabado agotando los recursos naturales y sin que haya causado cambios significativos en el medio ambiente. La selección natural, que no consiste más que en diferentes velocidades de reproducción, ya se trate de espiroquetas o de monos araña, puede ser alarmante desde el punto de vista emocional. Las poblaciones quedan por encima del bien y del mal. Crecen como respuesta a la disponibilidad de espacio, alimento y agua. Cuando los organismos son demasiado numerosos o mueren o bien se superan a sí mismos.

Si se superan a sí mismos, hallan maneras nuevas de procurarse espacio, carbono, energía y agua, lo que origina nuevos residuos. La producción cada vez mayor de nuevos desechos pone a prueba a los mismos organismos que los han originado. La vida se convierte en un personaje central, que crea sus propios problemas y las respectivas soluciones. Un ejemplo de este tipo de problema sería la contaminación creada por el uso de compuestos químicos en el espacio exterior como parte de un programa para la obtención de recursos por empresas del futuro. Esos residuos tóxicos podrían alcanzar la Tierra. La solución en nuestro planeta podría ser, como en el caso del problema de la acumulación de oxígeno en el primitivo microcosmos, la aparición de organismos nuevos capaces de tolerar o de utilizar aquellos residuos. Esto podría establecer una asociación entre organismos que se extendiera por millones de kilómetros, desde la Tierra hasta las lunas de Saturno.

Aunque no sea más que para trazar un esbozo abstracto del potencial de vida en el futuro, tenemos que mirar atentamente lo que ha sido la vida en el pasado. La espectacular evolución de la especie humana no puede separarse de la evolución de nuestros antepasados microbianos: las bacterias que construyeron nuestras células y las células de los vegetales y animales que constituyen nuestra alimentación. Los organismos que evolucionan conjuntamente a lo largo de miles de años van cambiando su constitución genética. Las

asociaciones heredadas evolucionan conjuntamente a medida que aparecen nuevas proteínas y modelos de desarrollo. Los organismos asociados acaban siendo totalmente dependientes unos de otros y ya no es válido seguir considerándolos individuos separados. El maíz cultivado es un claro ejemplo del tipo de coevolución que ha tenido lugar a lo largo de los últimos milenios, es decir, un periodo en que ya existía la especie humana. Este cereal ya no se seca de manera natural como las hierbas de las que evolucionó; ahora, en cada generación, manos humanas tienen que liberarlo de la gruesa cáscara que lo recubre. Su reproducción está ligada a nuestra especie. Sin nosotros no puede completar su ciclo vital porque se ha convertido en algo nuestro. La que fuera en otros tiempos una modesta planta autosuficiente del altoplano mexicano fue seleccionada por poblaciones hambrientas, que la han ido cultivando para que produzca mazorcas cada vez mayores. Se ha convertido en un importante producto básico para la humanidad. El lujo de ayer se ha convertido en la necesidad de hoy.

El fantástico aumento de la población humana dependía de las plantas y probablemente seguirá dependiendo de ellas y de sus cloroplastos derivados de bacterias, si nos hemos de trasladar a otro lugar del espacio. En el último periodo interglacial eran necesarias mil hectáreas para el mantenimiento de un cazador de la Edad de Piedra. Un espacio diez mil veces menor es suficiente para el mantenimiento de un moderno cultivador de arroz en el Japón. Es decir por cada cazador que erraba por la isla de Honshu ahora puede haber más de diez mil habitantes en un barrio de las afueras de Tokio (tabla 3). Igual que hicieron las células del microcosmos antes que nosotros, los seres humanos hemos de coevolucionar con las plantas, con los animales y con los microorganismos. Acabaremos probablemente agregados en densas comunidades basadas en la tecnología y organizadas mucho más estrechamente que las familias sencillas o extensas, o incluso que los estados nacionales o los gobiernos de las superpotencias. Es posible que en la Tierra existan ya las semillas apenas perceptibles del futuro supercosmos del espacio, equivalentes a los crosop-

Tabla 3 - ACELERACION EN LA PRODUCCION DE ALIMENTO

La cantidad de terreno necesaria para el mantenimiento de una familia humana ha disminuido de manera espectacular desde la época de los primeros fabricantes de hachas del Paleolítico, hace 35000 años (antigua Edad de Piedra), hasta los modernos cultivadores de arroz japoneses (otro ejemplo de la aceleración evolutiva).

Cultivo humano	*Tierra necesaria para el mantenimiento de una familia*	*Tiempo*
Cazadores paleolíticos	1000 hectáreas	Hace 35 000 años
Poblaciones neolíticas agrícolas y ganaderas	10 hectáreas	Hace 8000 años
Campesinos medievales	0,67 hectáreas	Hace 1000 años
Cultivadores de arroz en la India	0,20 hectáreas	Hace 100 años
Cultivadores de arroz en Japón	0,064 hectáreas	Actualidad

terigios de aletas carnosas que dieron origen a todos los vertebrados terrestres o al peculiar sistema de sexualidad meiótica que hemos heredado de determinados protistas. Los sistemas que derivarían de esas semillas podrían incluir diversas formas de organización política, económica y tecnológica.

Cuando los organismos se agrupan para formar nuevos seres, éstos poseen un nivel más elevado de organización. Las sociedades y poblaciones son grupos de organismos formados por miembros de la misma especie; las comunidades son grupos de organismos formados por miembros de especies diferentes (tabla 4). Los simbiontes, bajo ciertas presiones, se comportan como conjuntos únicos. Las bacterias individuales se convirtieron en los orgánulos de las células nucleadas; éstas se reunieron para formar individuos pluricelulares con un tamaño que era más de un billón (10^{12}) de veces mayor que el propio. Se ha denominado «superorganismos» a los seres vivos de tamaño mayor cuyos componentes son otros seres vivos.

Al ser la simbiosis la norma de la evolución y al estar los

organismos siempre organizados en comunidades de diferentes especies, ninguna de ellas podría hacer sola la transición hacia el espacio. Los seres humanos parecen adecuados para ayudar a dispersar la biota terrestre y pueden ocupar un lugar destacado en el supercosmos, de la misma manera que las mitocondrias, al utilizar oxígeno en el interior de las células de plantas y de animales, ayudaron a dichos organismos a poblar el medio terrestre. Pero para que los humanos desempeñen ese papel tan importante en la expansión de la vida hacia el espacio, han de aprender de las especies que han tenido éxito en el microcosmos. Deben pasar más rápidamente del antagonismo a la cooperación y tratar, en general, a las especies de la misma manera que un granjero trata a sus gallinas ponedoras o a sus vacas lecheras. En vez de perseguir animales raros por sus pieles, exhibir ostentosamente sus trofeos de caza encima de la chimenea, matar pájaros por deporte o arrasar con sus excavadoras los bosques húmedos, lo que ha de hacer es convivir con otros organismos. Eso significa ir formando poco a poco superorganismos. Contrariamente a sus antepasados cazadores, el propietario de una pequeña granja actual no mata una gallina o una vaca para un festín único, sino que cuida de esos animales y consume su leche y sus huevos.

Este cambio, de matar los organismos de los alrededores para alimentarse a ayudarlos a vivir consumiendo sus partes prescindibles, es un signo de la madurez de la especie. Por este motivo la agricultura, con el consumo de cereales y verdura pero conservando sus semillas, constituye una estrategia más efectiva que la simple recolección de plantas. El paso de la ávida glotonería, de la satisfacción instantánea al mutualismo a largo plazo, se ha llevado a cabo muchas veces en el microcosmos. En realidad, para ello no hace falta previsión ni inteligencia: los destruidores brutales acaban siempre destruyéndose a sí mismos, dejando automáticamente que aquellos otros organismos que se entienden mejor unos con otros hereden el mundo viviente.

Los antepasados de las mitocondrias de nuestras células debieron de ser bacterias crueles que invadían y mataban a su presa. Pero nosotros somos ejemplos vivientes de que tales

Tabla 4 - CUADRO DE JERARQUIAS

Objetos	*Unidad*	*Ejemplos*
átomos	*angstroms*	*H, C, N, P*
moléculas	*angstroms*	H_2, NH_3, aminoácidos
macromoléculas	*angstroms*	RNA, DNA, proteínas
orgánulos	*nanómetros*	núcleos, ribosomas
células	*micrómetros*	bacterias, células de la sangre
tejidos	micrómetros	cartílago, epitelio
órganos	milímetros	ovarios, hojas
organismos	centímetros	seres humanos, margaritas
poblaciones	metros	rebaño, nube de langostas
comunidades	metros, km	marismas, estanque
ecosistemas	km	bosque, llanura costera
biota	miles de km	total de organismos
biosfera	miles de km	superficie de la Tierra

Las *poblaciones* son grupos de individuos, miembros de una misma especie, que viven en un mismo lugar al mismo tiempo. Las *sociedades* son poblaciones con miembros diferenciados para funciones específicas.

Las *comunidades* son poblaciones de organismos de distintas especies que viven en el mismo sitio al mismo tiempo.

Los *ecosistemas* son grupos de comunidades que se autosustentan (sus miembros se alimentan ellos mismos y eliminan los residuos; no necesitan aporte exterior ni eliminación de materia para su autopoyesis). El ecosistema más pequeño que reconocen algunos es la *biosfera.*

La *biota* es el conjunto de la materia viva existente en la Tierra.

La *biosfera* es el lugar de la superficie de la Tierra donde se encuentra la biota. Se extiende desde la cumbre de las montañas hasta las fosas abisales oceánicas.

tácticas destructivas no son a la larga eficaces: las mitocondrias viven pacíficamente en el interior de nuestras células, proporcionándonos energía a cambio de vivienda. Mientras que las especies destructivas van y vienen, la cooperación aumenta con el tiempo. La población humana puede expandirse saqueando y arrasando la Amazonia, ignorando la mayor parte de la biosfera, pero la historia de las células dice que esto no puede durar. Para sobrevivir tan sólo una pequeña fracción del tiempo de los colonizadores bacterianos simbióticos de los océanos y la Tierra, el ser humano tendrá que cambiar.

A pesar de que comprendamos de dónde venimos, la visión de adónde vamos se va haciendo borrosa al mirar cada vez más lejos. Pero, como ya escribiera el visionario poeta

William Blake, «lo que ahora se prueba como verdadero, hubo un tiempo en que era sólo *imaginario*». Se pueden imaginar muchas vías de evolución que nuestra especie podría seguir hasta llegar a otra distinta de *Homo sapiens*. La más sencilla no sería precisamente la mutación, sino la recombinación sexual de genes preexistentes. A pesar de que todos los seres humanos pertenezcan a la misma especie, las poblaciones extremas son muy distintas. Una mujer pigmea, por ejemplo, es posible que no pudiera dar un hijo a un hombre watusi debido a lo estrecho de su pelvis. Este ejemplo ilustra la variedad natural presente en todas las especies, lo que podría, con el tiempo, originar especies divergentes incapaces de cruzarse debido a cambios externos resultantes de alteraciones en los simbiontes, en el comportamiento, en las mitocondrias, en los cromosomas o en las secuencias de nucleótidos del DNA.

Pero las células ahora pueden fusionarse por medio de una fecundación provocada y puede lograrse la acumulación de un gran número de cambios en los pares de bases del DNA. Los «escritos» genéticos de los futuros biotecnólogos pueden acabar siendo nuevos organismos. La utilización de conjuntos de genes bacterianos —o, como mínimo, los fundamentos para dicha utilización— es ya algo muy común. Gracias a la biotecnología, los fragmentos de DNA llamados plásmidos se insertan en las bacterias y así se replican rápidamente. Los genes que codifican las proteínas, incluso las proteínas humanas, pueden replicarse por medio de asociaciones con plásmidos. Las feromonas, afrodisíacos que modulan la sexualidad, o las hormonas pituitarias, substancias químicas que controlan, entre otros, los procesos de crecimiento, pueden ser producidas por bacterias y suministradas posteriormente a seres humanos, a otros animales o a plantas. Conjuntos enteros de genes, proteínas, hormonas y otros productos bioquímicos son ensamblados con pericia tecnológica para crear nuevas especies de microorganismos. Se han concedido patentes a quienes afirmaban que habían desarrollado nuevas cepas de seres vivos en el laboratorio. El conocimiento de la embriología y de los sistemas inmunitarios hará posible la clonación de células a voluntad para obtener organismos mayores y más complejos. Es posible

que los especialistas en ingeniería genética fabriquen nuevas especies de organismos y monstruos míticos para divertirse con ellos o para sacarles provecho. Las industrias del futuro, al convertir en realidad el mito de Fausto, probablemente nos abrumarán con sus posibilidades de fabricación de formas de vida hechas a medida del cliente.

El problema de la intervención directa en los procesos de evolución humana es fascinante. Actualmente se enfoca desde varios frentes distintos: la selección natural tradicional (deforestación y cría de animales y plantas) y la biotecnología, la informática y la robótica. Como la evolución acelera su marcha, la convergencia de los distintos enfoques será seguramente sólo cuestión de tiempo. Desde el punto de vista geológico, nos referimos a periodos de tiempo sumamente breves, seguramente incluso llegaremos a verlo nosotros.

La informática ha sido uno de los campos de más rápido crecimiento en la historia de la tecnología. Desde los tubos de vacío a los transistores y semiconductores, los elementos de los ordenadores que manejan la información han disminuido su tamaño hasta miles de veces en sólo unas cuantas décadas. Su velocidad de conmutación, el tiempo necesario para activar o desactivar un dígito binario, ha ido de veinte a mil millones de veces por segundo. Programas psiquiátricos que se llevaban a cabo con un tabique de por medio hicieron creer a los pacientes que estaban comunicándose con seres humanos.

Máquinas inteligentes están colaborando ya en el diseño de nuevos fármacos. Los ordenadores transfieren la información con eficiencia y conservan en su memoria enormes ficheros mucho mayores que los de cualquier persona. En las oficinas y en los hogares se está empezando a reemplazar la escritura sobre papel o «copia dura» por la «copia blanda» de los discos magnéticos y cintas. La implantación de empresas públicas informáticas a las que se puede conectar los discos, pantallas, teléfonos e impresoras de las casas particulares es ya una realidad. El acceso a la información a nivel mundial puede descentralizar los gobiernos y desmitificar el conocimiento profesional. La revolución en el campo de la información puede incluso conducir a una nueva era de democracia participativa.

Pero también puede fragmentar la sociedad dividiéndola en hogares electrónicos aislados unos de otros y favoreciendo nuevas formas de explotación política y nuevos delitos.

La sociedad se transformará cuando los documentos y libros computerizados, además de otros dispositivos informáticos, se conviertan en algo muy corriente por el bajo coste de los diminutos componentes silíceos de los ordenadores. La tendencia en alza de la conversión de dinero en material «electrónico» continuará. El aprendizaje se hará más fácil al ir apareciendo en el mercado más aparatos educativos. Aún más allá de la «oficina sin papel» se producirá lo que Christopher Evans, experto en informática, ha llamado «la muerte de la letra impresa».[51]. Los libros impresos tradicionales llegarán a ser un gasto superfluo y caro para las futuras generaciones, igual que las primeras ediciones o los originales impresos a mano lo son para nosotros. La producción de libros de texto y el comercio de libros en rústica parecerán empresas enormemente arduas. Cualquier masa abultada de papel manchada de tinta, como la que el lector tiene en sus manos en este momento, tendrá un aspecto tan anticuado como pueda tenerlo para nosotros la Biblia de Mainz de Johann Gutenberg. La compleja naturaleza de las sociedades del futuro acabará dependiendo de la inteligencia informática y será monitorizada por ella. Por lo tanto, los movimientos sociales, las transacciones comerciales y los descubrimientos exploratorios quedarán grabados en la memoria de las máquinas. La reproducción de los acontecimientos almacenados informáticamente será mucho más fiel que las «recreaciones» o que las novelas históricas, lo que hará posible revivir la historia y explorar el pasado. Por medio de la tecnología, la antigua capacidad de la vida de conservar el pasado en el presente, su fidelidad de recuerdo, mejorará muchísimo. Este fenómeno de la memoria, con la ayuda del cine, la historia escrita, las grabaciones electromagnéticas y otros tipos de tecnología informática, continúa en proceso de aceleración.

Puesto que los chips de silicona con miles de bits de memoria son ahora tan pequeños como para pasar por la cabeza de una aguja, los microprocesadores (ordenadores diminutos) son lo suficientemente ligeros como para poder ser insertados

en otras máquinas, que se transforman así en robots. Los robots tienen un gran potencial para el futuro. En 1976 los componentes robóticos de la nave espacial Viking realizaron una tarea que ningún ser humano hubiese podido llevar a cabo: después de aterrizar en la superficie helada, asfixiante y bombardeada por radiaciones ultravioleta de aquel planeta rojo, su brazo mecánico se extendió, tomó una muestra del suelo y analizó aquel regolito seco y oxidado. Otros robots son más «terrestres» y baratos. Unos autómatas metálicos con muchos brazos colocan neumáticos de coche con una productividad mucho mayor que sus equivalentes humanos. Las cadenas de montaje son producidas, a su vez, en otras cadenas de montaje. En Japón hay robots que fabrican piezas para otros robots. A medida que aumenta la importancia de las fábricas automatizadas en la economía mundial, es posible encontrar robots cada vez más parecidos a seres vivos.

De igual manera que los ordenadores y las máquinas confluyen en el nuevo campo de la robótica, la robótica y las bacterias pueden acabar uniéndose en el llamado «biochip», basado no en silicona, sino en compuestos orgánicos complejos. Es decir, se trataría de un ordenador orgánico. De la misma manera que los vegetales realizan la fotosíntesis, estas moléculas manufacturadas intercambiarían energía con sus alrededores. Pero en vez de transformarla en material celular, la convertirían en información. Las posibilidades que se derivan de este desarrollo son impresionantes. Esos ordenadores «vivientes» podrían acarrear millones de átomos de hidrógeno por segundo e integrarse en organismos conscientes. A esta distancia en el futuro, la imaginación se desborda. No se puede prever el resultado del intercambio de información entre las tecnologías informática, robótica y biológica. Podría ocurrir que sólo las predicciones más extravagantes tuvieran posibilidades de hacerse realidad.

¿Qué inesperados vericuetos puede seguir el destino del *Homo sapiens* en los próximos doscientos años? Examinemos un poco las muchas posibles contingencias futuras a partir de

las actividades biológicas. Como hemos visto, las células nucleadas de todos los animales, plantas y hongos contienen genes empaquetados en forma de cromosomas. Se sabe que las especies evolucionan de varias maneras, incluyendo una nueva disposición de los genes en los cromosomas, las acumulaciones de mutaciones en el DNA y por medio de simbiosis. Los cromosomas que producen cambios hereditarios causan mayores saltos en la evolución que los originados por las mutaciones en los pares de bases de los nucleótidos. Saltos evolutivos causados por simbiosis, como el caso de las amebas de Jeon, pueden establecer nuevas especies en pocas generaciones. Nada puede evitar que este tipo de variaciones se dé en poblaciones humanas y seguro que alguno de nuestros descendientes acabará experimentando mutaciones cromosómicas o adquiriendo nuevos simbiontes.

Para empezar, consideremos qué ocurriría si hubiese seres humanos mutantes cromosómicos con más de dos juegos de cromosomas. Esas personas poliploides serían análogas a las plantas del algodón, del trigo y de algunas flores de jardín, como los claveles, cuyas cepas comerciales son poliploides. Las personas poliploides serían probablemente de mayor tamaño y más vistosas que sus parientes diploides. Podrían estar más adaptadas a vivir en condiciones de menor fuerza de gravedad.

En la mayoría de casos, los mamíferos poliploides, con juegos extra de cromosomas, no sobreviven. Sin embargo, sabemos que cambios cromosómicos bruscos, como los relacionados con la escisión cariotípica, han dado origen a nuevas especies de mamíferos. La escisión cariotípica es el nombre de un proceso en que los cromosomas se fragmentan a la altura de los cinetocoros. Muchas especies de mamíferos del Cenozoico, comparadas con sus antepasados, muestran mitades de cromosomas rotos en los cinetocoros. Neil Todd, editor de la publicación *Carnivore Genetics Newsletter,* cree que la escisión cariotípica ha participado en la evolución del perro a partir del zorro, del cerdo a partir del jabalí e incluso de los monos antropomorfos a partir de sus precursores. La escisión cariotípica combinada con el incesto podría llevar, en principio

(quizás incluso acelerando el proceso evolutivo), a nuevas especies de humanos. Los conquistadores del supercosmos, si son descendientes nuestros o, como mínimo, descendientes de algunos de nosotros, es probable que tengan aún más cromosomas escindidos de los que tenemos nosotros.

Los humanos del futuro podrían llegar a ser de color verde como resultado de simbiosis. Un ejemplo de una especie de humano de este tipo producida por simbiosis es el *Homo photosyntheticus,* la solución imaginaria para el problema de la heroína, sugerida por Ryan Drum, especialista en algas. Los *Homo photosyntheticus* son heroinómanos o cocainómanos de color verde con cabezas rapadas, a los que se ha inyectado una fina capa de algas bajo el cuero cabelludo. En fila bajo la luz, esos homínidos verdes no tienen por qué ser toxicómanos, pero Drum sugiere que, aunque lo fueran, dado que se nutrirían a partir de sus propios recursos internos, dejarían de ser una carga para la sociedad.

La evolución ya ha sido testigo de alianzas alimenticias entre organismos hambrientos y bacterias o algas iluminadas por el Sol y autosuficientes. *Mastigias,* un medusoide del océano Pacífico, tranquilo celentéreo del tipo de la carabela portuguesa, ayuda a sus colaboradores fotosintéticos nadando hacia las zonas iluminadas con más intensidad, a cambio de lo cual recibe buena alimentación. Esto podría ocurrirle a nuestro *Homo photosyntheticus,* un tipo de vegetariano extremo que ya no ingiere alimentos, puesto que se nutre de substancias producidas por las algas que habitan bajo su cuero cabelludo. Con el tiempo, sus descendientes podrían llegar a perder la boca. Un destino evolutivo semejante se da en *Mesodinium rubrum,* un protista causante de mareas rojas. Se trata de un ciliado que conserva una boca vestigial que ya no utiliza para comer y es bien alimentado por las poblaciones de algas simbióticas que alberga en su interior. Además, de la misma manera que ocurriría con la piel del *Homo photosyntheticus,* que perdería el pelo y se volvería pálida para permitir el paso de suficiente luz para las algas, *Mesodinium rubrum* es mucho más translúcido que otras especies del mismo género y se desplaza nadando lentamente, como si lo hiciera tomando el sol.

De igual modo, cabría esperar que *Homo photosyntheticus* fuera translúcido, más bien perezoso y sedentario.

Unos gusanos planos de la especie *Convoluta roscoffensis* contienen algas verdes en el interior de las células de sus tejidos; en las playas de Bretaña y del Canal de la Mancha a menudo se les confunde con algas verdes. De un color verde obscuro, se les puede considerar en realidad «animales-planta». Los adultos poseen bocas cerradas no funcionales. Las algas que viven bajo la piel transparente del gusano lo nutren y reciclan un producto de desecho suyo, el ácido úrico. Para ello se quedan con una parte de la molécula de dicho ácido (la que tiene carbono y oxígeno) y transforman el resto en nuevo alimento para el gusano.

De manera análoga, las algas simbióticas de *Homo photosyntheticus* podrían encontrar finalmente su camino en las células germinales humanas. Primero invadirían los testículos y, una vez allí, penetrarían en los espermatozoides a medida que se fueran produciendo (esto no es ninguna idea descabellada; existen bacterias simbiontes de insectos que se sabe que hacen exactamente lo mismo: algunas penetran en los espermatozoides y otras son transmitidas a la siguiente generación a través de los óvulos). Las algas podrían asegurarse la supervivencia en los tibios y húmedos tejidos humanos acompañando al esperma en el apareamiento y penetrando quizás en los óvulos de la mujer, como si se tratase de una enfermedad benigna de transmisión sexual.

En las últimas fases de este fantástico guión de lo que podría ser la evolución futura, podemos imaginar grupos de *Homo photosyntheticus* tumbados al sol en masas compactas en las playas orbitales del futuro, jugueteando indolentemente con las algas marinas y con restos de conchas de moluscos.

Hemos sugerido tres posibles vías para la evolución de los humanos. Puede que resulten fantásticas, pero las lecciones aprendidas del pasado nos dicen que cambios semejantes son inevitables. Los detalles que hemos añadido quizá sean descabellados, pero el cambio es cierto. Podemos pensar en otras posibilidades especiales. Una es la «cibersimbiosis» o evolución de distintas partes del cuerpo humano en futuras formas

de vida. En este marco, los seres humanos resultan tan necesarios para el desarrollo del supercosmos como las mitocondrias o espiroquetas lo fueron para el microcosmos. Si logramos superar el destino que conduce a la extinción de los mamíferos y sobrevivimos en una forma alterada, podremos persistir no como «individuos», sino como vestigios. Podemos imaginarnos como análogos a los vestigios de espiroquetas; futuras formas humanas fragmentadas, como prótesis (quizá solamente sus delicados sistemas nerviosos diseccionados e insertados en brazos de plástico manejados electrónicamente) que prestan su poder decisorio para las funciones de mantenimiento de naves espaciales con capacidad reproductora.

Desafortunadamente para quienes creen que la humanidad es la apoteosis, la culminación de la vida en la Tierra, la idea de máquinas que se reproducen a sí mismas no es asunto de fantasía científica, sino algo real en la organización actual de la biosfera. Producción, reproducción y automantenimiento o autopoyesis son términos relacionados. Si consideramos la reproducción como el rasgo más característico de la vida y la biosfera como su unidad fundamental, entonces ni tan sólo la Tierra puede considerarse viva, ya que todavía no se ha reproducido. En realidad, sólo el DNA y el RNA pueden replicarse directamente. Todo lo demás —bacterias, muchachas, ballenas, sauces llorones, McDonalds y lanzaderas espaciales de la NASA— se reproduce indirectamente por medio de dichas moléculas. Se precisa gran cantidad de replicaciones moleculares y mucho crecimiento celular, desarrollo y construcción para que dos bacterias, dos muchachas, dos ballenas, dos sauces llorones, dos McDonalds y dos lanzaderas espaciales aparezcan en la biosfera.

Samuel Butler escribió que la idea de Darwin de «órganos rudimentarios» se podía aplicar también a artefactos humanos tales como las pipas o la vestimenta. Los botones innecesarios en las camisas, los bolsillos cerrados por costuras y los lazos decorativos en los ligueros se incluyen entre los caprichos arcaicos que han sobrevivido en las prendas de vestir. Butler

llegó a imaginar que la pequeña protuberancia en la parte inferior de su pipa podría derivar del antiguo tipo no portátil, en el cual la protuberancia, como el reborde inferior de una taza de té, servía para «evitar que el calor de la pipa dejase una marca en la superficie de la mesa en que descansaba». Para Butler, dichos órganos rudimentarios mostraban que los organismos, al igual que los artefactos mecánicos, estaban, si no diseñados, como mínimo forjados de manera más creativa de lo que podrían explicar las teorías de Darwin. También se centró en la idea del desarrollo de las máquinas para ridiculizar el ciego entusiasmo con que se había recibido la revolución industrial en su país.

Todo ello queda reflejado en la carta que con el título «Darwin entre las máquinas» dirigió Butler a *The Press,* publicación de la Iglesia de Cristo, en Nueva Zelanda, en 1863. En este divertido comentario escrito cuatro años después de que Charles Darwin publicara el tratado que marcaría una época, *El origen de las especies,* Butler compara la proeza adaptativa de la «vida mecánica» a la de los simples mortales de carne y hueso. Empieza diciendo: «Hay muy pocas cosas de las cuales la generación presente se sienta más orgullosa que de las fantásticas mejoras que se producen cada día en todo tipo de aparatos mecánicos. Pero ¿qué pasaría», se preguntaba, «si la tecnología continuase evolucionando mucho más deprisa que los "reinos animal y vegetal"? ¿Nos desplazaría en la supremacía de la Tierra? De la misma manera que el reino vegetal se desarrolló lentamente a partir del reino mineral», razonaba Butler, «y de igual manera que el reino animal sobrevino del vegetal, así ahora, en estos últimos tiempos, ha surgido un reino enteramente nuevo, del cual sólo hemos visto, de momento, lo que un día se considerarán prototipos antediluvianos de su clase».

Butler reconoció que las máquinas seguían siendo gobernadas por sus constructores, pero al pasar revista a las maravillas del siglo XIX se preguntaba si aquello seguiría ocurriendo en el futuro: «Les vamos dando cada día más poder y las proveemos de todo tipo de artilugios ingeniosos que les confieren autonomía y poder de regulación. Eso será para ellas

lo que el intelecto ha sido para el género humano». Ya fueron más eficientes en convertir las materias primas en energía para el trabajo y generalmente su mantenimiento era más barato que el de los animales de tiro. ¿Debería pasar mucho tiempo antes de que las máquinas fueran dotadas de órganos reproductores? «No hay nada que nuestra caprichosa estirpe desee más —decía Butler de manera burlona— que contemplar una unión con descendencia entre dos máquinas de vapor.»

Hoy, naturalmente, las proezas de las máquinas y su interdependencia con los seres humanos son mucho mayores de lo que eran en tiempos de Butler. En 1961, Norbert Wiener, fundador de la cibernética, escribía que la idea de que puedan existir mecanismos no humanos de gran poder y capacidad para desarrollar una línea de conducta y el peligro que ello representa no es algo nuevo. Lo que es nuevo es que actualmente poseemos mecanismos efectivos para ello. En el pasado dicha posibilidad se refería a técnicas en el campo de la magia, del cual surgen temas para leyendas y cuentos populares.[52] Desde el punto de vista de la biosfera tales mecanismos son únicamente una de las estrategias más recientes del microcosmos para extender sus dominios más allá de la escala presente hacia el supercosmos que se avecina. La clasificación de las máquinas como seres sin vida no niega que se reproduzcan, y se reproducen con cambios, con tanto afán como cualquier virus.

Maquinaria agrícola con propiedades que recuerdan las de los virus, tales como tractores o cosechadoras, proporcionan alimento a la humanidad, lo que causa un posterior incremento de la población. En medio de esa población se encuentran las personas que trabajan en el negocio de la agricultura y diseñan, desarrollan, construyen y venden más tractores y cosechadoras, entre otros aparatos, para aumentar la producción de alimento. Al incrementar el número de plantas de maíz y la población humana, los tractores se aseguran su propia reproducción. Son autocatalíticos. En realidad, el potencial de crecimiento exponencial de las máquinas (esa especie de aceleración evolutiva comentada anteriormente) excede con mucho al de los cuerpos de los seres humanos. Por ejemplo, la World

Future Society (Sociedad para el Futuro del Mundo) de Bethesda (Maryland) informaba que el índice de crecimiento anual de la poblacion de robots en Estados Unidos era, en 1984, de un treinta por ciento. Durante el mismo periodo, el índice de crecimiento de la población humana en aquel país fue inferior al dos por ciento.

Parece que nos guste etiquetar de «evolutivamente avanzadas» a las recientes y grandes poblaciones de mamíferos que se están adaptando y aún están en expansión; es decir, que se comportan como el ser humano. Incluso los científicos suelen denominar «superiores» a los organismos que combinan gran tamaño, fuertes índices de reproducción, cambios rápidos y aparición reciente en la evolución. Sostenemos aquí que, según dichos criterios, las máquinas están aún más «avanzadas» que nosotros desde el punto de vista evolutivo. Cambian de forma con una velocidad mucho mayor que cualquier animal; véase sino el coche, el teléfono, la fotocopiadora o el ordenador personal. Las máquinas pueden sobrevivir en ambientes más extremos que los humanos u otros animales con sistema nervioso. El tiempo de generación de las máquinas puede ser mucho más breve que el de los humanos. Las máquinas desempeñan mucho mejor que los humanos cálculos aritméticos o tareas de impresión de documentos. Las máquinas disponen de una más amplia gama de energía mecánica, incluyendo la fusión nuclear, la combustión y la energía fotoeléctrica.

Que las máquinas dependan aparentemente de nosotros para su construcción y mantenimiento no parece ser un serio argumento en contra de su viabilidad. Nosotros también dependemos de orgánulos, como por ejemplo mitocondrias y cromosomas, para nuestra vida; sin embargo, a nadie se le ocurre sostener que los humanos no son en realidad seres vivos. ¿Somos simples contenedores de nuestros orgánulos vivientes? En el futuro las personas podrán programar las máquinas para que se autoprogramen y autorreproduzcan haciéndolas más independientes de los humanos. Norbert Wiener creía que la reducción de sistemas oscilatorios de una frecuencia dada llevada a cabo por otros sistemas oscilatorios de diferente frecuencia hacia una frecuencia común constituía una frontera apasionante

de los incipientes procesos reproductivos eléctricos. La nota más esperanzadora para la supervivencia humana puede ser que actualmente somos tan necesarios para la reproducción de nuestras máquinas como las mitocondrias lo son para nuestra propia reproducción. Pero, debido a que las fuerzas económicas presionarán para mejorar las máquinas en todo, incluyendo la fabricación de otras máquinas con el mínimo esfuerzo humano, nadie puede vaticinar hasta cuándo durará esa nota esperanzadora. John von Neumann, diseñador de ordenadores, expresó sin lugar a dudas que se podrían construir máquinas suficientemente complejas como para reproducirse a sí mismas sin intervención humana.

Otro serio argumento en contra de la idea de que las máquinas están vivas es su carencia de DNA y RNA y el no estar constituidas por compuestos de carbono y nitrógeno disueltos en agua. Pero las colmenas, el fosfato cálcico de los huesos o los exoesqueletos de los insectos también carecen de DNA y RNA. La organización viva desaparece durante el proceso de disección analítica. La discusión sobre qué está vivo y qué no lo está adopta un aspecto fascinante cuando el estudio profundo de las transformaciones de los residuos y de una atmósfera saturada de substancias químicas producidas por la vida nos revela que no es posible trazar una línea divisoria clara entre los organismos y su medio ambiente, entre lo que es «natural» y lo que no lo es. Si se define la vida a partir de las entidades autopoyéticas capaces de reproducirse y basadas en compuestos de carbono reducido, entonces es evidente que las máquinas con capacidad autorreproductora de Von Neumann nunca podrán estar vivas, ya que no se basan en el carbono. Sin embargo, ¿qué significa decir «que se basan»? Por supuesto, toda invención humana se basa en última instancia en una variedad de procesos, que incluye la replicación del DNA, no importa cuál sea la distancia en el espacio o en el tiempo que exista entre aquella replicación y la invención. Esto no es una argumentación engañosa, una imagen indefinida de distinciones minuciosas o reduccionismo científico, sino más bien lo que podría denominarse «realidad postanalítica».

Por la simple extrapolación de modelos de la biosfera, podemos predecir que los seres humanos sobrevivirán, si es que son reconocibles, como sistemas de soporte conectados con aquellas formas de organización viva con el mayor potencial para la percepción y la expansión, a saber, las máquinas. Los cloroplastos, descendientes de *Prochloron,* han conservado un índice de crecimiento mucho más elevado en el interior de las células que el propio *Prochloron,* una bacteria verde de vida libre con la que están emparentados y que se encuentra distribuida, a modo de manchas, por el océano Pacífico. De manera análoga, los seres humanos asociados a máquinas poseen ya una notable ventaja selectiva en relación a las personas contrarias a ellas.

La futura evolución del supercosmos puede compararse a la formación de las células con núcleo a partir de comunidades de bacterias que evolucionaron conjuntamente en el microcosmos hace más de mil millones de años. La vida puede continuar su expansión por medio de entidades que podríamos denominar «tecnóbicas» y que se basarían en el DNA, el ser humano y las máquinas. Y dado el fenómeno de aceleración evolutiva aclarado por John R. Platt, la vida podría penetrar vastas regiones de las galaxias en periodos de tiempo asombrosamente cortos. En relación a anteriores avances evolutivos —la conquista de tierra firme y el vuelo alado en la atmósfera—, la colonización de las galaxias podría llevarse a cabo casi instantáneamente. Quizás en los próximos siglos el universo esté repleto de vida inteligente —filósofos de silicio y ordenadores planetarios cuyos primitivos antepasados estarían evolucionando precisamente ahora entre nosotros—. Desde una perspectiva a largo plazo, nuestra posición actual en relación al futuro no nos llevaría a ninguna situación de chovinismo humano. En el sistema solar, fuera de la Tierra, existen ya restos fósiles de máquinas. Desde 1976 hasta que se iniciaron los recortes en los presupuestos de la NASA, las naves espaciales Viking que giraban alrededor de Marte y aterrizaban en su superficie reconocían periódicamente la solitaria tranquilidad del paisaje marciano. Otras extensiones mecánicas de la biosfera, en forma de naves espaciales en órbita alrededor de diversos cuerpos celestes, principalmente la Tierra, están aún muy «vivas». Están conectadas al sistema y son realmente menos vulnerables a las amenazas externas de lo que lo somos nosotros, los seres vivos de carne y hueso.

Si extrapolamos al futuro geológico a muy corto plazo las tendencias de la vida, descifradas a partir de la lectura de su historia antigua, podemos decir que las extinciones de mamíferos y las sustituciones de unas especies por otras (incluyendo la nuestra) continuarán. De igual manera, surgirán nuevas formas de vida, tanto mecánicas como orgánicas. Es posible que las formas mecánicas superen pronto en número a las orgánicas; la tecnología, catalizada por futuras crisis, puede resultar tan importante en la próxima tanda de innovaciones evolutivas como los clones de células con núcleo lo fueron para la aparición de la tecnología. A juzgar por el alto grado de aceleración que existe en la transformación actual, vemos indicios de esas renovaciones a gran escala en la estructura básica de la vida en los próximos veinte años.

En una de sus cartas al director de *The Press,* Butler escribía: «Tratamos a nuestros caballos, perros, vacas y ovejas, por regla general con mucha consideración, dándoles lo que la experiencia nos enseña que es lo mejor para ellos y no hay duda de que nuestro consumo de carne les ha reportado más felicidad que no les ha sustraído; de igual manera es razonable suponer que las máquinas nos tratarán a nosotros con consideración, ya que su existencia depende de nosotros como la nuestra depende de animales inferiores. El hombre», añade como consuelo, «continuará existiendo; y lo que es más, seguirá mejorando y probablemente se sienta más a gusto en un estado de domesticación bajo la protección benéfica de las máquinas de lo que se siente en su actual estado salvaje». Samuel Butler bromeaba para mostrar lo disparatado de una visión puramente mecánica de la vida. Pero puede que haya sido también un visionario, que se apercibió de un aspecto importante del futuro supercosmos: la utilización de maquinaria tecnológica para transportar el cálido y húmedo ambiente del macrocosmos prefanerozoico hacia un futuro no humano tan fascinador como el pasado.

De vez en cuando aún oímos a científicos y a la prensa expresar su temor de que el ser humano infecte con microbios de la Tierra otros planetas a los que haya llegado en sus pruebas espaciales. Pero eso es precisamente lo que deberá hacer si ha de vivir durante largos periodos de tiempo en el espacio. Para vivir económicamente en estaciones espaciales, o en la Luna, Marte o incluso más alla, se tendrá que importar la tecnología del microcosmos. Naturalmente, esto no significa simplemente infectar otros planetas; se trata de «abonarlos», inoculándoles los tipos y número correcto de microorganismos para que se pueda desarrollar un hábitat adecuado. La enfermedad a menudo refleja el crecimiento excesivo y oportunista de microbios que se encuentran normalmente presentes en el medio: en realidad, la muerte de tales microbios puede no curar la enfermedad sino más bien exacerbarla, ya que algunos microbios causantes de enfermedades cumplen el saludable propósito de reprimir a otros microorganismos. Por ejemplo, se puede evitar el crecimiento de bacilos gram-negativos, bacterias normales del intestino que, sin embargo, pueden causar neumonía en recién nacidos sensibles, introduciendo determinadas cepas de estreptococos. La salud de los ecosistemas es comparable: depende de las poblaciones de distintos organismos y del metabolismo, crecimiento y evolución conjunta de la biota asociada. La idea de que las estaciones espaciales puedan convertirse en jardines del Edén automantenidos en ausencia de comunidades microbianas es sencillamente ridícula. Tales estaciones no serían más que «latas de conserva» estériles en el espacio.

Estudios preliminares llevados a cabo en el Ames Research Center de la NASA, en Moffett Field (California), muestran la importancia de la complejidad biológica en la creación de sistemas vivos estables. Experimentos con microorganismos encerrados en cajas de plástico y expuestos a la luz sugieren que un mayor número de especies —en otras palabras, mayor complejidad— tiende a aumentar la estabilidad y la producción fotosintética de alimentos. Aunque nuestros descendientes, mejor adaptados que nosotros, puedan crear el supercosmos, es posible que se necesiten millones de años para que las enormes cantidades de seres en interacción en comunidades estrechamente organizadas produzcan ecosistemas capaces de soportar vida humana fuera de la Tierra. Probablemente nosotros no podríamos infectar otros planetas a la ligera aunque lo intentáramos; es preciso que sean inoculados. Sembrar el supercosmos parecería requerir una combinación poco común de travesura científica, espíritu colonizador y destreza en «jardinería microbiana».

A pesar de que su continuación pueda depender de su capacidad de desprenderse del cordón umbilical y extenderse más allá del útero solar, la misma vida ha probado hasta ahora que es inmortal. Como un fenómeno planetario destacable, la autoorganización de la vida parece violar el segundo principio de la termodinámica, según el cual el universo tiende hacia la desorganización; es decir, se le acaba la «cuerda». Pero si la vida evolucionó a partir del universo, ¿cómo podría basarse en un conjunto de principios distintos de los de aquel universo? ¿Qué es la vida? Paradójicamente, hemos tenido que esperar hasta el final antes de intentar responder a esta pregunta.

Los pueblos antiguos veían la naturaleza como *animus,* como espíritus en movimiento, animales y dioses. Más recientemente se creía que la vida en la Tierra era un ejemplo de los procesos creativos divinos. En el pensamiento cartesiano y newtoniano la vida es contemplada «objetivamente» como una parte de los movimientos físicos universales. La vida gira y funciona como los engranajes de un gran reloj mecánico; los organismos actúan y reaccionan como las bolas en una mesa de billar. Aquí todo es estímulo y respuesta, causa y efecto. Ahora se habla de nuevas analogías basadas en la informática: los aminoácidos son una forma de «input», el DNA es un proceso de datos y los organismos son el «output», la «copia dura» controlada por aquel «programa maestro», aquel «software reproductivo» que son los genes. En este libro nos he-

mos quedado con una visión algo diferente y más abstracta de lo que es la vida. Una nueva visión de la vida menos fácil que las visiones mágicas, religiosas o científicas, obviamente anticuadas. La vida, ese sistema acuático de macromoléculas basadas en el carbono, es autopoyesis reproductiva. La visión autopoyética de la vida es circular. La vida es una máquina metábolica que no sólo se reproduce, sino que almacena información intensamente y la utiliza para poder resistir su propia desintegración.

Buckminster Fuller, arquitecto y filósofo, ha denominado la biosfera «nave espacial terrestre», ya que gira alrededor del Sol al mismo tiempo que éste se desplaza y mueve a gran velocidad a través del espacio. Pero la analogía de la Tierra con una nave espacial sugiere que nosotros somos los pilotos planetarios, cosa que no es cierta. El físico Lewis Thomas propuso otra imagen cuando comparó la biosfera con una célula, lo que sugiere orquestación y unidad, y también con un embrión, lo que sugiere crecimiento futuro. John Platt ha ampliado este último símil, destacando que la biosfera es posible que esté atravesando algo semejante al canal cervical en el parto. Aunque no quiere que se considere esta analogía de manera no crítica, Platt observa que al final del embarazo las hormonas originan cambios que preceden al parto; empiezan los dolores, que se repiten de manera cíclica, y la madre se da cuenta de que los acontecimientos que conducen al parto ya no pueden detenerse y ni siquiera pueden retardarse. Esa imagen sugiere que el lento periodo de gestación de la Tierra puede terminar pronto, llevando a un rápido crecimiento en el supercosmos. Finalmente —aunque nuestra lista dista mucho de ser exhaustiva—, para James Lovelock, químico atmosférico independiente, la mejor representación de la vida es un sistema ambiental que se automantiene y que se llama Gaia.[53]

Gaia —nombre dado por el novelista inglés William Golding, respondiendo a solicitud de Lovelock y tomado de la antigua diosa griega de la Tierra— trabaja de manera muy misteriosa. Gaia, el superorganismo constituido por todo el

conjunto de la vida en la Tierra, mantiene hipotéticamente la composición del aire y la temperatura de la superficie del planeta, regulando las condiciones para la permanencia de la vida. A pesar de que no se conoce bien la complicada red de relaciones biológicas que la vida utiliza para ello, el hecho de que la biota controle porciones de la superficie del planeta está tan bien establecido como el hecho de que nuestro cuerpo se mantiene a temperatura constante. Gaia, por tanto, se preocupa de que el nitrógeno y el oxígeno de la atmósfera, tan importantes para la vida, no se degraden en nitratos y óxidos de nitrógeno, en sales y gas hilarante, que podrían frenar todo el sistema. Si no hubiera una regeneración del oxígeno por parte de los organismos fotosintéticos, constante y extendida por todo el planeta, si no se produjera también una liberación de nitrógeno gaseoso por parte de las bacterias respiradoras de nitratos y amoníaco, en poco tiempo nuestra atmósfera se haría inerte y venenosa. Bajo la influencia reactiva de una lluvia de rayos cósmicos que cayeran constantemente sobre ella, la Tierra no sería más acogedora para la vida de lo que pueda serlo el ácido planeta Venus. El medio ambiente de nuestro planeta es producto de la vida y es controlado por ella, en la misma proporción que la vida es producto del medio ambiente y está influenciada por él.

Lo que sorprende de nuestro planeta azul con salpicaduras blancas es que se haya mantenido en él la idiosincrasia de la vida, con su increíble diversidad y su peculiar unidad bioquímica. A los humanos, que estamos obligados a comunicarnos por medio de lenguas estándar, nos resulta difícil captar la idea que define la vida como un sistema autopoyético reproductivo. Sin embargo, según la idea de Lovelock, que él denomina teoría de Gaia, la biota terrestre, en la cual está incluida la especie *Homo sapiens,* es autopoyética: reconoce, regula y crea las condiciones necesarias para su continua supervivencia.

El registro fósil confirma la idea de que la superficie de la Tierra ha estado regulada continuamente desde el primer momento en que la vida microbiana apareció y empezó a extenderse. La hipótesis de Gaia, según la cual la temperatura y

la composición de los gases reactivos de la atmósfera terrestre están regulados activamente por la biota, fue desarrollada por Lovelock cuando trabajaba para la NASA sobre la manera de detectar la existencia de vida en Marte. Vio que en la atmósfera terrestre coexistían gases que, cuando se trabaja con ellos en sistemas químicos sencillos, reaccionan con rapidez, con facilidad y en su totalidad para formar compuestos estables. Esos gases parece que actúen por su cuenta, sin observar aparentemente las leyes que rigen el equilibrio químico estándar. Lovelock observó que el comportamiento químico de la atmósfera terrestre era tan extraño que únicamente podría deberse a las propiedades colectivas de los organismos, es decir, a la biota. Y es que dicha biota, especialmente sus componentes microscópicos, produce constantemente cantidades asombrosas de aquellos gases reactivos. Lovelock creyó que, si buscaba aquellas improbables mezclas de gases en las atmósferas de otros planetas con espectroscopios montados en telescopios, podría detectar biosferas extraterrestres sin moverse de la Tierra. Al dirigir su atención a Marte, descubrió que allí había un equilibrio totalmente comprensible a partir únicamente de la física y la química. Aseguró la ausencia de vida en Marte al observar que allí no se daba el fenómeno de Gaia. Pero en 1975, la NASA, preparada para aterrizar en el planeta rojo, no quiso difundir la sencilla solución que Lovelock había hallado al antiquísimo problema de la existencia de vida en Marte.

Pero la batalla no estaba perdida. La nave espacial Viking se lanzó en 1975 y llegó a Marte en 1976, donde realizó dos vuelos orbitales y dos aterrizajes. Los experimentos biológicos que se llevaron a cabo a bordo y en el suave aterrizaje en la superficie de aquel planeta tuvieron un éxito espectacular, mostrando en definitiva que no existen pruebas de la existencia de vida en el planeta rojo. El trabajo de Lovelock proporcionó la base para la comprensión de los resultados. Además, el análisis que hizo condujo a una nueva visión de la biosfera. Tan grande como el misterio de la vida en cualquier lugar del universo era el misterio de la vida en la Tierra. ¿Por qué tiene nuestro planeta una atmósfera que dista tanto de lo que cabría esperar basándose en la química? Dado que el oxígeno gaseoso constituye el 20 por ciento de la composición de la atmósfera, el relativo desequilibrio de metano, amoníaco, gases sulfurados, cloruro de metilo y yoduro de metilo entre otros, es enorme. A partir de los cálculos químicos, las cantidades de todos esos gases, que tan fácilmente reaccionan con el oxígeno, deberían ser mínimas e imposibles de detectar. Pero ahí están y se las encuentra en cualquier parte que se busque. Lo cierto es que la cantidad de gas metano presente en la atmósfera terrestre supera en 10^{35} (¡un uno seguido de 35 ceros!) veces la que cabría esperar si se considera la cantidad de oxígeno disponible para reaccionar con dicho gas. Otros gases tales como el nitrógeno, el monóxido de carbono y el óxido nitroso sólo son diez mil millones, diez y diez billones de veces, respectivamente, más abundantes de lo que deberían ser si se tiene en cuenta sólo la química.

Otro enigma está relacionado con la temperatura de la Tierra. A partir de las leyes de la física parece ineludible que la luminosidad total del Sol, es decir, su producción de energía en forma de luz, ha aumentado en los últimos 4000 millones de años tal vez hasta un cincuenta por ciento. Sin embargo, las pruebas que se han obtenido a partir del registro fósil indican que la temperatura de la Tierra ha permanecido relativamente estable, manteniéndose el valor medio alrededor de los 22 grados centígrados (como la temperatura normal de una habitación), a pesar de las bajas temperaturas extremas que cabría esperar con aquel endeble Sol primitivo. Parece como si, además de la regulación que la vida ejerce en la composición de los gases a escala planetaria, existiera también un control continuo de la temperatura de la Tierra. ¿Cuál es ese termostato oculto?

Rechazando soluciones místicas, Lovelock lanzó la teoría de que la biota, y especialmente el microcosmos bacteriano, debe de haber regulado el medio ambiente a escala planetaria desde su aparición en la Tierra. Las formas de vida reaccionan para perturbar las crisis geológicas y cósmicas; resisten los ataques a su integridad individual tanto como les es posible; y aquellas acciones individuales llevan a un manteni-

miento general de las condiciones que son favorables para la supervivencia colectiva. (Esto no significa que no se hayan dado nunca fluctuaciones, porque las hubo. Por ejemplo, a juzgar por la amplia extensión de los bosques tropicales fósiles del Cretácico, el planeta era sensiblemente más cálido en tiempos de los dinosaurios y, antes y después de aquel periodo, extensas capas de hielo cubrieron parte del planeta. Pero entre estas fluctuaciones periódicas y después de ellas, el planeta se estabilizó y nunca llegó a las altas temperaturas de Venus o a las bajísimas de Marte.)

Si la biota no hubiera respondido a importantes perturbaciones externas tales como el aumento de la luminosidad solar o los impactos de meteoritos, tan devastadores como las bombas nucleares, nosotros no estaríamos aquí ahora. Lovelock llegó a la conclusión de que la vida no está rodeada por un medio esencialmente pasivo al cual se ha adaptado, sino que se va construyendo una y otra vez su propio ambiente. La atmósfera, como una colmena o el nido de un pájaro, forma parte de la biosfera. Puesto que el dióxido de carbono se transforma dentro de las células y puede ser utilizado para controlar la temperatura del aire, parece probable que una de las maneras en que la vida regula la temperatura del planeta consista en modular el nivel atmosférico de dióxido de carbono.

Algunos científicos están en contra del análisis de Lovelock. La idea de la vida en la Tierra como un superorganismo que responde a las amenazas y agresiones ambientales para asegurarse la supervivencia no concuerda con las ideas aceptadas de la evolución darwiniana, que depende de la *competencia* entre los organismos en lucha. Si se admite que Lovelock está en lo cierto, ¿cómo se las arregla la masa de genes que hay en el interior de las células de los organismos de la superficie terrestre para *saber* que se están enfrentando a una crisis? ¿Cómo pudieron los microorganismos superar el aumento de los niveles de oxígeno atmosférico? ¿Cómo pudieron actuar conjuntamente como una entidad concertada y coordinada para hacer frente a crisis de este tipo? W. Ford Doolittle, biólogo molecular que ha llevado a cabo una investigación primordial en la biología molecular de los plástidos, rechazó la idea de que la naturaleza pudiese ser, según sus propias palabras, «maternal». Richard Dawkins, profesor de zoología de la Universidad de Oxford, relacionó la teoría (entonces hipótesis) de Gaia con el «teorema de la BBC», haciendo una referencia peyorativa a la idea presente en los documentales de televisión que muestran la naturaleza como un equilibrio y armonía maravillosos. Dawkins no podía concebir la evolución de los mecanismos de control de Gaia sin pensar en un universo lleno de planetas muertos, a los cuales les habrían fallado los sistemas de regulación homeostáticos, y con un puñado de planetas (entre los que se encuentra también la Tierra) esparcidos por el espacio, que habrían tenido éxito y estarían bien regulados.[54]

Para responder a tales críticas, Lovelock diseñó algunos modelos matemáticos. El más espectacular, llamado Daisy World (el mundo de las margaritas), considera un planeta imaginario que puede estar cubierto sólo por margaritas blancas y negras y alguna que otra vaca comedora de margaritas. Las flores representan dos especies que crecen en manchas y cubren hasta el setenta por ciento del planeta, dentro de unos márgenes específicos de temperatura. Ninguna de las dos especies crece a temperaturas muy frías, lo hacen lentamente a bajas temperaturas, más deprisa a temperaturas cálidas y no crecen (en realidad, mueren) a temperaturas sofocantes superiores a los 45 grados centígrados.

Lovelock, que trabajó posteriormente con Andrew Watson en la Marine Biological Association, de Plymouth (Inglaterra), observó que las margaritas blancas y negras podían actuar como termostatos gigantescos estabilizando la temperatura de todo un planeta por el simple hecho de crecer en él. El fenómeno no es místico, sino sinérgico: el inesperado resultado de un sistema complejo.

Podemos imaginar cómo funciona Daisy World. Consideremos un planeta de margaritas blancas y negras que gira en torno a una estrella, un sol que va haciéndose más brillante poco a poco, pero de manera constante. Al principio, al estar el sol frío, no crecerán muchas margaritas. Sin embargo, a

medida que el sol se va haciendo más caliente, van surgiendo manchas de margaritas de ambos colores, que crecen rápidamente. Pero cuando las flores de las margaritas negras se abren y van produciendo un mayor número de descendientes, su color oscuro absorbe la luz del sol e impide que pueda reflejarse de nuevo hacia el espacio. El crecimiento de grupos de margaritas negras, que absorben calor, tiene como efecto el calentamiento de un planeta que, de lo contrario, sería frío. Pero el entorno se vuelve pronto caluroso en exceso y empieza a limitar el crecimiento de las margaritas negras en las inmediaciones. El aumento de las temperaturas locales produce una temperatura más alta en conjunto de lo que cabría esperar en un mundo sin margaritas. Empiezan a crecer entonces grupos de margaritas blancas. Esto lleva a un aumento de la reflectividad planetaria, o albedo, ya que la superficie blanca de los pétalos de las margaritas refleja la luz hacia el espacio, lo que causa el regreso a unas temperaturas más frías en todo el planeta. Las margaritas negras vuelven a surgir. Pero el sol, mientras, continúa produciendo cada vez más calor y las margaritas blancas, al reflejar el calor, vuelven a crecer de nuevo rápidamente y a enfriar el planeta. Resumiendo, el sol se hace más caliente, surgen grupos de margaritas blancas y Daisy World se enfría, lo que hace surgir de nuevo las manchas de margaritas negras más calientes que, al calentarse en exceso, vuelven a producir condiciones más favorables para el crecimiento de margaritas blancas, las cuales, una vez más, enfriarán Daisy World al aumentar su albedo. Y así sucesivamente hasta que el sol se convierte en un gigante rojo que abrasa todas las margaritas. Con todo, dentro de unos ciertos límites de temperatura, las margaritas actúan de manera muy sencilla como un termostato, manteniendo el mundo en condiciones para la vida a pesar de un aumento potencialmente mortal de la cantidad de energía solar que alcanza el planeta. Hasta un nivel destacable, las flores regulan silenciosamente la temperatura del planeta dentro del limitado margen requerido para su supervivencia a medida que el sol se calienta inexorablemente.

En modelos más parecidos al mundo real, son el crecimiento, el metabolismo y el intercambio de gases de los microorganismos, más que las margaritas, los que constituyen los complejos sistemas retroactivos físicos y químicos que modulan la biosfera en que vivimos. Los seres vivos, a través de su acción sobre el agua y las nubes, ejercen una inmensa influencia moderadora sobre la Tierra. Por poner un ejemplo, unas diminutas algas que flotan en el océano podrían originar una hipotética glaciación simplemente por el hecho de crecer más deprisa en las latitudes septentrionales. Al construir sus caparazones de carbonato cálcico, que después de su muerte se depositan en el fondo del mar, disminuyen la cantidad de carbono disponible para producir dióxido de carbono. Al ser este compuesto químico un gas «invernadero» que actúa como un manto invisible que deja penetrar la luz y la atrapa en forma de calor, su disminución en la atmósfera se traduce en temperaturas más bajas. Pero al disminuir la temperatura crecen menos algas, se utiliza menos dióxido de carbono para fabricar caparazones y el planeta se vuelve tropical. Los sistemas retroactivos están tan entrelazados que la muerte masiva de las algas marinas, unida a la erosión marina de las rocas carbonatadas, proceso que libera CO_2 a la atmósfera, también puede ser causa de un aumento de la temperatura atmosférica.

En efecto, en 1979 y 1980 unos investigadores europeos analizaron aire fósil atrapado en los hielos polares y descubrieron que hace 20 000 años, en el punto culminante de la última glaciación, el dióxido de carbono representaba solamente una tercera parte del que había al principio de la revolución industrial. Sólo un poco antes de que los humanos empezaran a dedicarse a la agricultura y formaran las primeras civilizaciones, el dióxido de carbono aumentó hasta los valores preindustriales. Ese aumento de su concentración, y el consiguiente aumento de la temperatura que tuvo lugar hace 12 000 años, se produjo en menos de cien años y no puede explicarse completamente por procesos geofísicos o geoquímicos tradicionales como la actividad tectónica o el efecto del clima. Una fluctuación tan abrupta sólo podía provenir de la vida. Lovelock cree que la muerte súbita de una importante cantidad de algas marinas probablemente causó aquel rápido aumento de la

temperatura en todo el planeta, una transformación ambiental que permitió a los humanos salir de las cuevas donde vivían y poblar la Tierra.

Con el tiempo la biota generó complicados sistemas de control de los cuales ahora empezamos a tener una vaga idea. La multitud de sistemas sensoriales de los organismos vivos, su capacidad metabólica y de crecimiento exponencial y la extraordinaria variedad de formas de vida en interacción en la Tierra son suficientes para explicar, en principio, la modulación ambiental a escala planetaria.

Pero una modulación ambiental de ese tipo también se da a menor escala. Incluso en la reducida escala de los animales considerados individualmente, la regulación de la temperatura implica más de un sistema único de retroalimentación. Llevemos a cabo mentalmente un experimento en el que una persona —una colección de células, igual que la biota— tenga que afrontar un súbito descenso de la temperatura ambiental. El primer tipo de respuesta sería aquella que evolucionó más recientemente: la basada en la alta tecnología, que consistiría en conectar el termostato, enchufar una estufa eléctrica o incluso pagar una factura a una empresa de servicios por medio de un módem conectado al propio ordenador personal. Aunque estos sistemas pueden ser formas cada vez más corrientes de regular la temperatura, al ser tan recientes son aún los sistemas retroactivos más frágiles. En un nivel inferior se encuentran las respuestas de la «baja tecnología» al descenso de temperatura: envolverse en mantas y ponerse ropa extra. Esta clase de tecnología, heredada de la costumbre de atrapar y cazar animales de climas fríos y utilizar sus gruesas pieles, tiene unos cien mil años de antigüedad. La costura, una gran mejora introducida en esta original tecnología, pudo haber contribuido a que los pueblos del este atravesaran el estrecho de Bering hacia Norteamérica, a juzgar por los hallazgos arqueológicos de agujas de coser hechas de madera. El bucle retroactivo en el vestir es sencillo: cuando el tiempo se vuelve frío, se cubre el cuerpo con la ropa; cuando hace calor, se descubre. El comportamiento de regulación de la temperatura apareció en el ser humano bastante antes que los sistemas de

calefacción con combustibles fósiles, y todavía prevalece. Todos los pueblos de la Tierra utilizan hoy en día algún tipo de vestuario.

Si seguimos exponiendo a la tensión del frío al sujeto de nuestro experimento mental, induciremos en él un mecanismo de regulación de la temperatura aún más antiguo y más seguro: los sistemas retroactivos comportamentales, ajenos a la tecnología. Esas respuestas se remontan a hace unos doscientos millones de años, y consisten en ponerse a correr, frotarse las extremidades y cruzar los brazos muy juntos, encogiendo el cuerpo hasta adoptar la postura fetal cuando hace frío. Cuando se ven amenazados por el calor, los mamíferos como nosotros responden con un comportamiento contrario: extienden las extremidades y buscan la sombra. En general, se vuelven menos activos. Todos los mamíferos comparten este tipo de mecanismo de control de la temperatura, que depende de que se tenga un sistema nervioso suficientemente complejo, que es la base del comportamiento aprendido. Al acercarnos al macrocosmos original los sistemas retroactivos se hacen más fáciles de pronosticar y son más básicos y seguros.

Aún más antiguos que los sistemas basados en el comportamiento son los mecanismos de control estrictamente fisiológicos. Al enfriarse el medio externo, los vasos sanguíneos de los mamíferos automáticamente se apartan de la superficie de la piel por la contracción de los músculos de sus paredes. Lejos de la superficie aumenta el aporte de sangre a los órganos vitales, que así quedan protegidos. La congelación es el siguiente paso. Los dedos de las manos y pies y otras extremidades se hielan y entumecen. Si continúa la exposición al frío, se produce la separación de las extremidades. La nariz, las orejas y los dedos se desprenden. Al sudar, que es la respuesta contraria, se evapora agua para enfriar el cuerpo. Estas respuestas fisiológicas a la temperatura aún son más antiguas y están más enraizadas que las otras. Puede que sean tan antiguas como los mismos animales (unos seiscientos millones de años).

Si en nuestro experimento imaginario continuamos en-

friando a nuestro hombre, llevaremos el sistema autopoyético hasta el límite y pondremos al descubierto el antiguo mecanismo genético del control de la temperatura. Si el medio ambiente se enfría más allá de los límites de tolerancia del ser humano, éste morirá y no dejará más descendientes. Si la presión del frío continúa, toda la población y la comunidad entera morirán congeladas sin dejar descendencia. Sin embargo, nuevas comunidades y poblaciones reemplazarán a las antiguas y algunas con métodos más efectivos para combatir el frío. Sólo sobreviven organismos diferentes o mutantes con tolerancia a las condiciones climáticas severas. Se ejerce una enorme presión de selección sobre aquellos organismos que pueden mejorar los efectos del frío ambiental reinante.

Y esto es lo que siempre ha ocurrido en la Tierra. Si la presión ejercida es lo suficientemente severa, sólo los organismos tolerantes sobreviven. En otras palabras, cuando hace demasiado calor, las células mueren. Y lo mismo ocurre cuando hace demasiado frío. Cuando están en el punto justo, las células dejan mucha descendencia. Pero el «punto justo» difiere en cada forma de vida. La selección natural darwiniana es el sistema retroactivo más antiguo de Gaia, en el cual se basan todos los sistemas más modernos, sean tecnológicos o basados en el comportamiento. Actualmente, si se tiene frío, lo primero que se hace es subir la calefacción, luego ponerse un suéter y después empezar a temblar para generar calor. Si la amenaza del frío continúa, se pasa a un estado de sopor y disminución del metabolismo, y si la amenaza no cesa, la muerte es el final. Pero la muerte individual forma parte de sistemas de estabilización ambiental mayores. Antes de morir el individuo aumenta la temperatura ambiental y al morir y no dejar descendencia disminuyen las posibilidades de que en el futuro otros periodos de frío destruyan la vida, ya que se facilita la reproducción de otros organismos adaptados al frío.

No podemos sino hacer conjeturas sobre los mecanismos que utiliza la vida para regular la temperatura y las condiciones atmosféricas a escala planetaria. Sin embargo, desde

una perspectiva global no parece que el equilibrio natural sea frágil o que se esté cerca del colapso; se trata de mecanismos resistentes. Los sistemas de control ambiental más importantes son instituciones microscópicas que han sido probadas por el tiempo, producen gases y cambian el albedo, además de ser más potentes y antiguas que el quemado de combustibles para la calefacción y el uso de termostatos caseros. En cuanto al futuro, nuestra especie puede ser como las margaritas negras en su mejor momento, que crecen tan deprisa que dejan el medio ambiente en condiciones óptimas para otras aunque ellas se estén abrasando hasta la muerte. Cada individuo, cada población y cada especie es una opción que se ejerce sólo en condiciones favorables. Si ocurre la catástrofe, como ocurre de manera regular en la historia de la vida, algunas opciones ya no serán viables. Pero su fin, ya sea en forma de muerte individual o de extinción, hace que la biosfera sea, en conjunto, más fuerte, más compleja y con mayor poder de recuperación. (Esto, naturalmente, no tiene nada que ver con el progreso o el bienestar humano. No existen pruebas sobre el progreso en el registro fósil; sólo las hay de cambio y de expansión.)

Además, parece que la mayor parte de las opciones de los procariontes aún son válidas. Ni la existencia de especies ni su extinción es una propiedad de las bacterias. Aunque la muerte como fenómeno individual es continua en las bacterias, las presiones intensas ejercidas sobre el reino monera, como una empresa de intercambio genético a escala global, condujeron a un intercambio rápido de biotecnologías naturales, índices de crecimiento de las poblaciones muy elevados y, en general, a la capacidad de resistir con las aptitudes metabólicas intactas incluso durante las crisis planetarias más severas.

Sólo con una completa exploración científica de los mecanismos de control de Gaia podemos esperar que se consigan hábitats autosuficientes en el espacio. Si tuviéramos que diseñar ecosistemas cerrados que repusieran sus propias provisiones vitales, tendríamos que estudiar la tecnología natural de la Tierra. El poblar otros mundos haciendo posible que

nos paseemos por los jardines de, pongamos, Marte es un gigantesco proyecto sólo imaginable a partir de la perspectiva de Gaia. Deberíamos conocer nuestras raíces en el microcosmos antes de ir hacia ese limbo que es el supercosmos. Pero tanto si el ser humano consigue llevar el medio ambiente primitivo del microcosmos al espacio como si muere en la empresa, la vida parece sin duda tentada de ir en esa dirección. Y la vida, hasta el momento, lo ha resistido todo excepto la tentación.

Apéndices

Notas

1. Citado en W. Kaufman, 1980, *Discovering the mind,* Vol. 3, *Freud versus Adler and Jung,* McGraw-Hill, Nueva York, p. 467.

2. Forum, *Harper's Magazine*, Vol. 280, No 1679 (Abril 1990), 37-48.

3. J.L. Hall, Z. Ramanis y D.J. Luck, «Basal body/centriolar DNA: molecular genetic studies in Chlamydomonas», *Cell,* 59 (1989), pp. 121-132.

4. D. Sagan, *Biospheres: Metamorphosis of Planet Earth* (McGraw-Hill, Nueva York, 1990; edición en rústica Bantam Books, Nueva York, 1991).

5. L. Margulis y E. Dobb, «Untimely Requiem», recesión del libro *The End of Nature,* de W. McKibben (Random House Nueva York, 1989), *The Sciences* (enero-febrero 1990) pp. 44-49.

6. M. McFall-Ngai, «Luminous Bacterial Symbiosis in Fish Evolution», capítulo 25 en L. Margulis y R. Fester, eds, *Evolution and Speciation: Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation* (MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991), pp. 380-409.

7. P. Atsatt, «Fungi and the Origin of Land Plants», capítulo 21 en L. Margulis y R. Fester, eds, *Evolution and Speciation: Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation* (MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991), pp. 301-306.

8. Primer verso del poema 1440 (aproximadamente 1877), en T. H. Johnson, ed., *The Complete Poems of Emily Dickinson* (Little, Brown & Co., Boston/Toronto, 1890, 1960), pp. 599-600.

9. Ultima estrofa del poema 1400.

10. Los eucariontes incluyen los familiares reinos de las plantas y los animales, así como los no tan familiares de los hongos y los

protoctistas. El término informal *protistas* se refiere a los microorganismos, a menudo unicelulares, que son miembros del reino Protoctistas. Este reino incluye amebas, ciliados, parásitos causantes de la malaria (y, en general, los protozoos), diatomeas, algas, mohos acuáticos, mixomicetos, plasmodios parásitos de plantas y muchos otros obscuros organismos que no se ajustan a ningún otro reino. Se calcula que actualmente existen aproximadamente 200 000 especies de protoctistas, agrupadas en unos cincuenta tipos. Los otros tres reinos eucarióticos, siguiendo el orden de su evolución son: Animales, que se desarrollan a partir de embriones formados tras la fusión de un espermatozoide y un óvulo; Hongos, que comprende mohos, setas, levaduras y organismos relacionados que se desarrollan a partir de esporas; y Plantas, que incluye musgos, hepáticas, helechos, coníferas y plantas con flores, que se desarrollan a partir de embriones rodeados de tejido materno. El quinto reino, que es el primero que evolucionó, es el reino Moneras, compuesto enteramente por procariontes o bacterias. (Los varios nombres que se dan a las bacterias: moneras, procariontes, gérmenes, etc., proceden de su estudio por separado en diferentes campos de la ciencia. Historia natural, botánica, microbiología, medicina, agricultura y zoología han mantenido maneras muy diferentes de identificar, nombrar y clasificar los microorganismos.) El término *microbio* no tiene un significado específico en taxonomía o evolución y es equivalente al de *microorganismo,* con el que se designa cualquier organismo que no puede verse a simple vista. Todos los procariontes y muchos organismos eucariotas, como protistas y hongos, también son microbios, ya que su tamaño es inferior al poder de resolución del ojo humano.

11. Algunos biólogos aún no creen en el origen simbiótico de mitocondrias, cloroplastos y otros orgánulos eucarióticos. Sin embargo, cada vez son menos. Esperamos que el peso de las pruebas aportadas en este libro convenza a los biólogos, y a todas las demás personas, de la necesidad de contemplar la vida como un fenómeno simbiótico.

12. Charles Darwin, *The Variation of Animals and Plants under Domestication,* Vol. 2 (Organe Judd, Nueva York, 1868), p. 204.

13. Francis Crick, *Life Itself: Its Origine and Nature* (Simon & Schuster, Nueva York, 1981).

14. Steven Weinberg, *The First Three Minutes* (Basic Books, Nueva York, 1977). Existe traducción española: *Los tres primeros minutos del universo,* Alianza Editorial, Madrid, 1992.

15. El uno por ciento restante del peso seco de los organismos se compone de elementos raros pero igualmente indispensables como el zinc, potasio, sodio, manganeso, magnesio, calcio, hierro, cobalto, cobre y selenio.

16. Para la relación entre autopoyesis y el origen de la vida, véase G. R. Fleischaker, «Origins of Life: An Operational Definition», en *Origins of Life and Evolution of the Biosphere,* vol. 20 (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990), pp. 127-137.

17. En 1979, Stanley M. Awramik, de la Universidad de California en Santa Bárbara, descubrió, fantásticamente conservadas, unas microestructuras multicelulares redondas, grasas y filamentosas en las rocas de la formación de Warrawoona, en Australia, que tienen una antigüedad de unos 3400 millones de años. Si los fósiles tienen la misma edad que las rocas de la zona, este hallazgo prueba que ya existían estructuras aún más complejas existieron incluso antes de lo que sabíamos hasta ahora. Pero no se pueden usar directamente isótopos radiactivos para datar rocas sedimentarias (las únicas en las que se encuentran fósiles), porque se componen de partículas de distintas edades. Para datarlas se parte del cálculo seguro de la edad de las rocas volcánicas de los alrededores. En la muestra australiana, como las rocas estaban sueltas cuando se recogieron y no se sabe a ciencia cierta de dónde procedían, la datación de los fósiles no es segura.

18. El carbono, en la naturaleza, se presenta en varias formas casi idénticas desde el punto de vista químico, pero físicamente diferentes. Las diferencias se deben al número de neutrones en el núcleo del átomo de carbono. La mayor parte del carbono que hay a nuestro alrededor está en la forma estable de C^{12}. Menos de un uno por ciento está en forma del isótopo estable C^{13} y una cantidad aún menor se encuentra en forma de C^{14}, inestable y radiactivo. Como en el proceso de la fotosíntesis los organismos utilizan principalmente el C^{12}, se ha utilizado la razón de C^{12} a C^{13} en materiales naturales como una pista para saber si determinados depósitos de carbono se originaron por fotosíntesis.

19. La ecuación para calcular el crecimiento bacteriano es 2^n, donde *n* representa el número de generaciones. Por tanto, 3 generaciones por hora $\times$ 48 horas = 2^{144} bacterias.

20. Las esporas representan una manera de sobrevivir a largos periodos de desecación u otras condiciones adversas. Se forma una cápsula alrededor del material genético y sintetizador de proteínas de la célula que los altera químicamente, tras lo cual el resto se desintegra. La espora vuelve a germinar cuando las condiciones se vuelven favorables. Se sabe que las esporas de bacterias pueden permanecer inactivas y en condiciones de revivir durante décadas. A pesar de que la duración de la vida humana no permite el testimonio directo, es muy posible que las esporas secas puedan durar cientos, incluso miles de años.

21. Véase MacLyn McCarty, *The Transforming Principle: Disco-*

vering that Genes Are Made of DNA (W.W. Norton, Nueva York, 1985). Existe versión española: *El principio transformador,* Reverté, Barcelona, 1988.

22. Sorin Sonea y Maurice Panisset, *The New Bacteriology* (Jones and Bartlett, Boston, 1983), p. 22.

23. La idea de que la vida no sólo utiliza y está hecha de su medio ambiente, sino que también regula la composición química de la atmósfera (manteniéndola alejada del equilibrio químico), se conoce con el nombre de hipótesis de Gaia.

24. Sonea y Panisset, *op. cit.,* p. 85.

25. Citado en Frederick Turner, «Cultivating the American Garden», *Harpers Magazine* (Agosto 1985), pp. 45-52. Para más detalles, véase *Earth Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution,* ed. J. William Schopf (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1983). El libro de Schopf proporciona un análisis técnico y diferentes puntos de vista sobre las primeras fases de la vida. Para un conocimiento elemental menos técnico del periodo, con tanta frecuencia pasado por alto, que va desde el comienzo de la vida a la aparición de la célula eucariótica, hace unos 1000 millones de años, véase Lynn Margulis, *Early Life* (Jones and Bartlett, Boston, 1982).

26. James Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth* (Oxford Univ. Press, Nueva York, 1979), p. 69. Existe versión española: *Gaia: Una nueva visión de la vida sobre la tierra,* Orbis, Barcelona, 1987.

27. Chet Raymo, *Biography of a Planet* (Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984), p. 72.

28. W.H.F. Doolittle y Carmen Sapienza, «Selfish genes: the phenotype paradigma and genome evolution», *Nature,* 284 (April 17, 1980), 601-603.

29. Un metro de DNA por cromosoma multiplicado por 46 cromosomas que contiene cada célula hacen 46 metros de DNA por célula; multiplicado por el billón de células que hay en el cuerpo dan un total de 46 billones de metros de DNA en el cuerpo de una persona. La luna está sólo a 200 000 millones de metros de distancia.

30. Comunicación oral. Para detalles, véase R. Klein y A. Cronquist, «A consideration of the evolutionary and taxonomic significance of some biochemical micromorphological and physiological characters in the Thallophytes», *Quarterly Review of Biology,* 42 (1967), pp. 105-296.

31. Para referencias y detalles sobre el trabajo de Jeon (así como para toda la biología celular microbiológica y técnica en que se basa este libro), véase Lynn Margulis, *Symbiosis in Cell Evolution* (W.H. Freeman, San Francisco, 1982).

32. Para detalles sobre las reuniones de Axelrod con participantes

en juegos de competición de suma no cero, ver Robert M. Axelrod, *The Evolution of Cooperation* (Basic Books, Nueva York, 1984). Hay versión española: *La evolución de la cooperación,* Alianza Editorial, Madrid, 1986.

33. *Thermoplasma* crece de manera óptima en una atmósfera con un 5 por ciento de oxígeno y muere bastante antes de que el oxígeno a su alrededor alcance el nivel del 20 por ciento, que es el actual en la atmósfera.

34. Algunos eucariontes que viven de manera simbiótica en el interior de otros organismos han perdido sus mitocondrias. (Su estructura y comportamiento reproductor indican claramente que son eucariontes y no bacterias que evolucionaron sin mitocondrias.) Sin embargo, otros las perdieron y posteriormente adquirieron nuevas bacterias simbióticas como sucedáneos de las mitocondrias (una simbiosis dentro de otra simbiosis). Estos sucedáneos no son exactamente nuevas mitocondrias, ya que funcionan en un medio ambiente mucho más pobre en oxígeno de lo que necesitan las mitocondrias para sobrevivir. Parecen desempeñar, sin embargo, las mismas funciones.

35. 1 angstrom = 10^{-10} m. 10 000 angstrom = 1 micrómetro. 1 micrómetro = 10^{-6} m. Las células bacterianas normalmente tienen una anchura de un micrómetro. 1000 micrómetros hacen un milímetro y 10 000 micrómetros un centímetro. Una esfera de unos 500 micrómetros puede verse, como un minúsculo grano de arena, a simple vista. El microcosmos subvisible, el de los objetos observables con diversos tipos de microscopios, va desde varios centenares de micrómetros hasta aproximadamente 0,001 micrómetros o 10 angstrom, la distancia transversal de la hélice del DNA.

36. David C. Smith, «From extracellular to intracellular: the stablishment of symbiosis», *Proceedings of the Royal Society* (Londres), 204 (1979), pp. 115-130.

37. Al referirse, como se ha dicho antes, la palabra *flagelo* también a las proyecciones en formas de látigo acopladas al motor rotatorio de la bacteria, es mejor llamar *undulipodios* a los flagelos eucarióticos y utilizar la palabra *flagelo* sólo en relación a las bacterias.

38. Charles Darwin, *The Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favored Races in the Struggle of Life* (primera edición 1859; Penguin Classics, Middlesex, 1968), p. 453.

39. M.A. Sleigh, «Origin and evolution of flagellar movement», *Cell Motility,* 5 (1985), pp. 137-173. Este número contiene las actas de un seminario dado en un programa de ciencia cooperativa entre Japón y Estados Unidos, llamado «Fundamental Problems of Movement of Cilia, Eukaryotic Flagella and Related Systems».

40. El anatomista británico D. Wheatley ha escrito un libro entero, *The Centriole: A Central Enigma* (Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, Nueva York y Oxford, 1983) en que revisa maravillosamente una gran cantidad de bibliografía biológica, pero deja sin resolver el enigma del título.

41. Albert Einstein, «Letter to Jacques Hadamard», en Jacques Hadamard, *The Psychology of Invention in the Mathematical Field* (Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, 1945), reeditado en 1954 (Dover Publications, Inc., Nueva York), pp. 142-143.

42. John von Neumann, *The Computer and the Brain* (Yale Univ. Press, New Haven, 1958), p. 82. Existe traducción española: *El ordenador y el cerebro,* Bosch, Barcelona, 1980.

43. Citado en Alan Moorehead, *Darwin and the Beagle* (Harper & Row, 1969 Nueva York y Evanston, III), pp. 259-61. Hay traducción española: *Darwin: La expedición en el Beagle*, Serbal, Barcelona, 1983.

44. «The Damned Human Race», en Mark Twain, *Letters from the Earth,* ed. Bernard De Voto (1938; reedición Harper & Row Publishers, Nueva York, 1962), pp. 215-216.

45. El libro de Calder, *Timescale: An Atlas of the 4th Dimension* (Viking Press, Nueva York, 1983) es de lectura obligada para todo aquel que se interese por el microcosmos en expansión. Hace sólo unos pocos años que se empieza a tener una visión global de la manera en que la vida ha evolucionado en nuestro planeta. Hay más de una historia de la Tierra y son constantes las discusiones científicas sobre el tema, así como la revisión de los detalles. Calder compara este nuevo campo de la historia de la vida con los primeros trazados de mapas, y a las personas que trabajan en él con los primeros que se dedicaron a representar sobre el papel el perfil de tierras y mares. Su libro, que «trata de ordenar los importantes acontecimientos acaecidos entre el origen del universo y el presente», es uno de los primeros atlas de esta nueva materia que es la cronografía, la representación gráfica del tiempo. En él se demuestra que la historia es algo más que una colección de fechas, cerámicas y nombres de reyes. En realidad, la historia escrita tradicional que se aprende en los libros de texto no es más que la punta del iceberg. La verdadera historia es la prehistoria, nuestra herencia de la vida. Quien tenga interés en profundizar este campo debe leer *Biography of a Planet,* de Chet Raymo (Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1984). Este libro, escrito en un estilo llano, es un viaje muy bien guiado a lo largo del desarrollo de la vida desde sus comienzos hace 3000 millones de años.

46. William Irwin Thompson, «On Food-Sharing, Communion, and Human Culture», un sermón dado en la catedral de San Juan el Divino, 1 de noviembre de 1981.

47. Thompson, uno de los críticos sociales más serios de nuestro tiempo, ha escrito *The Time Falling Bodies Take to Light* (St. Martin's Press, Nueva York, 1981), un libro encantador en el que se examina la predilección de nuestra especie por la mitopoyesis o creación de mitos, que luego nos tomamos muy en serio.

48. John R. Platt, «The Acceleration of Evolution», *The Futurist* (Febrero 1981).

49. Para un análisis genial de la extraordinaria ruta social que hay que seguir para que la observación particular de alguien se convierta en un hecho científico, véase el libro de Ludvick Fleck, *The Genesis and Development of a Scientific Fact,* escrito en 1936 en su versión original alemana. En 1979 la University of Chicago Press publicó una asequible versión inglesa magníficamente traducida y anotada. Existe versión española: *La génesis y el desarrollo de un hecho científico,* Alianza Editorial, Madrid, 1986.

50. Este relato puede encontrarse en *The Science Fiction Hall of Fame,* Vol. 1, ed. Robert Silverberg (Doubleday, Garden City, Nueva York, 1970), p. 87-111.

51. Christopher Evans, *The MicroMillennium* (Washington Square Press, New York, 1981), pp. 112-121. El libro proyecta el futuro a corto, medio y largo plazo de los ordenadores.

52. Norbert Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine* (MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1961), p. 176.

53. Para una animada discusión de la hipótesis de Gaia a cargo de su autor, véase Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth* citada en la nota 26 y *Ages of Gaia* (W.W. Norton, Nueva York, 1988), de la que existe traducción española, *Las edades de Gaia,* Tusquets Editores (Metatemas 25), Barcelona, 1991.

54. Richard Dawkins, *The Extended Phenotype* (W.H. Freeman, San Francisco, 1982), p. 236.

Epílogo: De Microcosmos a Gaia

Uno de los cambios más destacados que ha experimentado nuestra visión de la Tierra en las últimas décadas ha sido el reconocimiento de la importancia que tiene la vida en la geoquímica de nuestro planeta, especialmente las formas de vida que escapan al poder de resolución del ojo humano. La Tierra ha funcionado como un sistema vivo mucho antes de que nuestra especie apareciese. Comunidades de microorganismos muy distintos colaboran en el mantenimiento de los sedimentos de la superficie y de la atmósfera del planeta; lo están haciendo desde hace más de 3500 millones de años. Y lo seguirían haciendo aunque nuestra especie llegase a desaparecer algún día. No hay ningún bosque, desierto, lago o cualquier otro sistema ecológico de cualquier tamaño que no se encuentre infiltrado, cubierto o penetrado por un tipo u otro de sistema microbiano.

El estudio de las comunidades microbianas que cubren los suelos, especialmente en algunas zonas costeras y lagunas hipersalinas, nos proporciona algunas claves para saber cómo han podido mantenerse dinámicamente estables los ecosistemas bacterianos. Es probable que esos tapetes microbianos hayan cubierto todas las costas y los continentes emergidos durante más de 3000 millones de años y que hayan actuado como una fuerza geológica, dejando su huella en el paisaje. Muchas veces, sin embargo, se ignora la existencia de estas comuni-

dades. Algunas zonas intermareales, costas sin vegetación y cubiertas por tapetes microbianos, son consideradas a menudo totalmente improductivas. La vida que albergan pasa inadvertida. A simple vista, un corte del sedimento muestra unas franjas de distintos colores que se extienden por unos pocos milímetros. La observación al microscopio electrónico de esos sedimentos, que parecen barro sucio, nos muestra una gran variabilidad biológica y una gran cantidad de microorganismos; se cuentan por cientos de millones en un solo centímetro cúbico.

Al tiempo que avanzábamos en el conocimiento del microcosmos que nos rodea y en el cual estamos inmersos, el desarrollo de la tecnología espacial nos permitía adquirir una imagen física exacta de nuestra posición en el universo, donde no somos más que un pequeño planeta, el tercero alrededor de una entre los millones de estrellas de nuestra galaxia. En palabras de Claude Nicolier, el único astronauta suizo, después de su vuelo en la lanzadera Atlantis, en 1992: «La Tierra no es más que un astro en medio de los otros; a corta distancia, naturalmente, parece muy grande, pero lo importante es que es "nuestro" planeta. Y aunque de día no puede apreciarse la presencia de vida, de noche se detectan las grandes ciudades. Hay luz, se detecta la presencia humana».

La Tierra ha sido comparada a una nave espacial que girase alrededor del Sol. Pero es una nave singular; una pálida luciérnaga viajera en la profunda noche del espacio interestelar, con capacidad para convertir la energía solar en multitud de compuestos orgánicos. Desde que nuestro planeta iniciara su viaje, hace unos 4500 millones de años, han ocurrido muchas cosas en él. La aparición de la vida en su superficie hace unos 3800 millones de años fue un acontecimiento muy importante, pero aún lo fue más el establecimiento (hace unos 3500 millones de años) de los primeros ecosistemas, hecho que permitió que aquella vida haya persistido y haya aumentado enormemente su diversidad. Los frecuentes accidentes y catástrofes ocurridos desde entonces no han eliminado la vida, sino que ésta ha vuelto a proliferar

con formas más evolucionadas. Los últimos «accidentes» en la historia de la Tierra han sido la aparición de nuestra especie y la capacidad que ésta ha demostrado para alterar su entorno. Es posible que sea el accidente del que le cueste más recuperarse, ya que los humanos no cejamos en nuestro empeño de infligir a la Tierra un trato despiadado.

En 1969, James E. Lovelock formuló la hipótesis de Gaia. En sus palabras, «las condiciones físicas y químicas de la superficie de la Tierra, de la atmósfera y de los océanos se han hecho adecuadas para la vida debido a las actividades de los propios organismos. Esto contrasta con la visión anterior, que mantenía que la vida se había adaptado a las condiciones existentes en la Tierra, y que ésta y la vida habían evolucionado separadamente».

De acuerdo con el concepto de Gaia, la biosfera, la atmósfera, los océanos y el suelo constituyen un sistema de retroalimentación o cibernético que encuentra en cada momento el ambiente físico-químico más adecuado para la vida. En cualquier tiempo dado, este sistema es relativamente constante, tanto en las características ambientales como en las formas y fisiología de los organismos. Lovelock se refirió primero a esta situación de equilibrio como «homeostasis» (un término propuesto por el fisiólogo de la Universidad de Harvar, Walter B. Cannon), para señalar el notable grado de constancia en el que se mantienen los seres vivos a pesar de los cambios de su ambiente. Pero ese equilibrio es dinámico. Los seres vivos cambian y aparecen nuevos ecosistemas. La evolución conjunta de la Tierra y de la vida es una «homeorresis», es decir, una sucesión de equilibrios que permiten la evolución de nuevas formas de vida y los cambios en la superficie de la Tierra.

El término homeorresis hace más justicia al concepto de Gaia, que propone que los seres vivos han transformado profundamente la superficie de la Tierra, al mismo tiempo que ellos sufren continuos cambios, en un proceso de coevolución. La evolución de la vida ha sido el triunfo del ingenio, de la invención, evitando las amenazas y destrucciones no a la manera humana de restaurar el «antiguo régimen», sino a la

manera flexible de Gaia, adaptándose al cambio y convirtiendo un intruso letal en un poderoso amigo. Las distintas religiones nos muestran con frecuencia fantásticas combinaciones de criaturas quiméricas; una mezcla de distintas partes de animales reunidas para construir seres imaginarios. No se trata de una idea nueva, propia de la mente humana. Los seres vivos eucariotas somos el resultado de uniones simbióticas que se han prolongado —perfeccionándose y haciéndose muy complejas en algunos casos— a lo largo de miles de millones de años. La simbiosis es un mecanismo evolutivo básico, que se ajusta a la teoría darwiniana de la supervivencia del mejor adaptado, como una muestra de que la cooperación es mucho más ventajosa que la lucha encarnizada.

Nuestro planeta es en conjunto un sistema vivo, resultado de la interacción entre la biota y los componentes geoquímicos de la Tierra. La especie humana no es más que un ejemplo reciente de las aproximadamente treinta millones de especies que se supone habitan la Tierra. Desde la perspectiva planetaria, los humanos seríamos una plaga para el ambiente, más destructiva que cualquier otra conocida. Los organismos de crecimiento rápido se desarrollan y reproducen hasta que agotan los recursos a su alcance y el medio que los circunda les resulta inhóspito, haciéndose imposible su supervivencia. Los humanos estamos acelerando este proceso y, si no logramos alcanzar un desarrollo sostenible y nos empeñamos en agotar los recursos naturales como se está haciendo en la actualidad, nuestra especie estará abocada irremediablemente a la extinción.

Sin embargo, las comunidades de microorganismos que constituyen los tapetes microbianos y que han perdurado desde los orígenes de la vida en la Tierra, persistirán aun después de la desaparición de la especie humana. Los principales mecanismos del control ambiental de Gaia son el metabolismo, el crecimiento, la muerte y la extinción de las poblaciones que la integran. Hemos de tomar ejemplo de las comunidades microbianas; darnos cuenta de que nuestro bienestar depende del bienestar de las demás formas de vida. Tenemos que aprender —como los microorganismos hicieron

hace más de 3500 millones de años— a reciclar. A reparar. Creerse independientes de la biosfera sería ilusorio. No dominamos la naturaleza, ni lo hemos hecho nunca.

Ricard Guerrero
Universitat de Barcelona
Enero 1995